

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra informatiky

Mikropočítačový řídicí modul pro silová zařízení

Microcontroller Control Module for Power Devices

Zadání bakalářské práce

Student: **Tanasis Vlachopoulos**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2612R025 Informatika a výpočetní technika

Téma: **Mikropočítačový řídicí modul pro silová zařízení**
Microcontroller Control Module for Power Devices

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Navrhněte univerzální řídicí modul připojitelný k mikropočítači pro ovládání silových elektrických obvodů. Modul musí využívat pouze bezkontaktní spínací prvky a musí mít zpětnou vazbu indikující skutečné zapnutí (proudový odběr) řízeného obvodu. Vyzkoušejte i možnosti realizace zpětné vazby s měřením velikosti proudu.

1. Seznamte se způsoby měření a detekce protékajícího proudu v obvodech s napájením střídavým proudem.
2. Vyberte způsoby detekce protékajícího proudu, které lze realizovat s galvanickým oddělením.
3. Otestujte vybraná zapojení a porovnejte jejich citlivost a měřicí rozsah.
4. Dle citlivosti a měřicího rozsahu navrhněte vhodné rozhraní pro mikrokontrolér.
5. Navrhněte a realizujte spínací obvod pro silové obvody se zpětnou vazbu, vhodný pro řízení mikrokontrolérem.
6. Navržená zapojení realizujte a otestujte jejich citlivost, měřicí rozsah a spolehlivost.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRANDŠTETTER, Pavel a kol.. Elektronika - Prvky elektronických obvodů. Ostrava: Ediční středisko VŠB-TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1481-0.
- [2] UHLÍŘ, Ivan. Elektrické obvody a elektronika. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 142 s. ISBN 80-01-02466-0.
- [3] Prevodníky [online]. Slovenská technická univerzita v Bratislave. [vid. 23.09.2015]. Dostupné z: http://web.svf.stuba.sk/kat/FYZ/fyzika_ta_vola/skripta/other/prevodniky.pdf
- [4] KESL, Jan. Elektronika III. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-075-X.
- [5] VACULÍK, Vlastimil. Snímače proudu. Brno: VUT 2011. Diplomová práce, VUT, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky.
- [6] Current measurement applications handbook [online]. Zetex semiconductors. 2008. [vid 23.9.2015]. Dostupné z: http://www.diodes.com/_files/products_appnote_pdfs/zetex/an39.pdf

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Olivka, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016



doc. Dr. Ing. Eduard Sojka
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty


Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 27. dubna 2016

Blodpiles
.....

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě 27. dubna 2016



.....

Rád bych poděkoval mému vedoucímu práce, panu Ing. Petru Olivkovi, Ph.D., za velmi cenné rady a doporučení a také za čas strávený při konzultacích, čehož si velice cením.

Abstrakt

Předmětem této práce je návrh mikropočítačem řízeného modulu pro spínání silových elektrických zařízení. Primární vlastností toho modulu je schopnost snímat velmi nízké proudové odběry a poskytovat tak zpětnou vazbu o provozu zařízení. Modul rovněž umožňuje silové zařízení spínat a vypínat na základě zpětné vazby z měření a vnějšího vstupu.

Vzhledem k rozdílným napěťovým a proudovým úrovním na silové části a mikropočítači bylo nutné tyto části navrhnout jako galvanicky oddělené.

Tato práce rozebírá několik možností realizace měřících a spínacích obvodů a popisuje návrh jedno z možných řešení.

Klíčová slova: Snímání proudu, spínání, střídavý proud, silová zařízení, mikropočítač, galvanické oddělení, optočlen, optotranzistor, optotriak, Arduino

Abstract

Subject of this thesis is design of microcontroller control module for switching power devices. The main feature of this module is ability to detect very low power consumption and provide feedback about operation of the power device. The module also allow switching based on feedback from the measurement or external input.

Due to different voltage and current levels on the power device and the microcontroller, it was necessary to design this parts as galvanically isolated.

This thesis analyzed several options for implementation of measuring and switching circuits and describe one of possible solutions.

Key Words: Current detection, switching circuits, alternating current, power devices, microcontroller, galvanic isolation, optocoupler, phototransistor, phototriac, Arduino

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	10
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	13
1 Úvod	15
2 Metodiky snímání proudu	16
2.1 Přímé metody snímání proudu	16
2.2 Nepřímé metody snímání proudu	16
3 Galvanické oddělení	21
3.1 Galvanické oddělení měřícím transformátorem	21
3.2 Galvanické oddělení optočlenem	22
4 Praktické snímání proudu	25
4.1 Měřící přístroje	25
4.2 Zapojení s optočlenem BPC-817	25
4.3 Zapojení s optočlenem LTV-814	34
4.4 Zapojení s optočlenem 6N137	37
4.5 Zapojení s měřícím proudovým transformátorem	44
4.6 Závěr měření	48
5 Metody spínání obvodů	50
5.1 Elektromagnetické relé	50
5.2 SSR relé	51
6 Návrh mikropočítačového řídicího modulu	53
6.1 Zapojení s optočlenem BPC-817 a SSR relé	54
6.2 Zapojení s optočlenem BPC-817 a mechanickým relé	56
6.3 Zapojení s optočlenem 6N137	58
7 Závěr	61
Literatura	62
Přílohy	63
A Tabulky naměřených hodnot	64

B	Zdrojové kódy	67
B.1	Řízení mikropočítače v zapojení s optočlenem BPC-817	67
B.2	Řízení mikropočítače v zapojení s optočlenem 6N137	69

Seznam použitých zkratek a symbolů

AC	– Alternating Current
A/D	– Analog to Digital
DC	– Direct Current
I/O	– Input/Output
LED	– Light Emitting Diode
PWM	– Pulse Width Modulation
SSR	– Solid State Relay
TTL	– Transistor–Transistor Logic
VF	– Vysoko Frekvenční

Seznam obrázků

1	VA charakteristika úbytku napětí V_F v závislosti na proudu I_F (dioda BY550-1000) [11]	18
2	Hallův jev [4]	19
3	Měřicí zařízení s otevřenou smyčkou	19
4	Zapojení měřicí transformátoru pro měření proudu [18]	22
5	Optočlen s fototranzistorem [13]	23
6	Optočlen s hradlem NAND [14]	23
7	Optočlen LTV-814 s antiparalelně zapojenými diodami na vstupu [15]	24
8	Schéma zapojení měřicího obvodu s optočlenem BPC-817	26
9	Úbytek napětí na diodách D1–D3 U_D a výstupní signál optočlenu U_{OUT} v závislosti na proudu do zátěže I_Z pro optočlen BPC-817C s usměrňovacími diodami BY55-1000	29
10	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 110$ mA, pro optočlen BPC-817	30
11	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 0,4$ mA, pro optočlen BPC-817	31
12	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 0,3$ mA, pro optočlen BPC-817	31
13	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 0,1$ mA, pro optočlen BPC-817	31
14	Velikost úbytku napětí v závislosti na protékajícím proudu a typu diody	32
15	Velikost výstupního napětí v závislosti na protékajícím proudu a typu diody	33
16	Schéma zapojení měřicího obvodu s optočlenem LTV-814	34
17	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 110$ mA, pro optočlen LTV-814	35
18	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 5$ mA, pro optočlen LTV-814	36
19	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 1,2$ mA, pro optočlen LTV-814	36
20	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 0,2$ mA, pro optočlen LTV-814	36
21	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 0,1$ mA, pro optočlen LTV-814	37
22	Schéma zapojení měřicího obvodu s optočlenem 6N137	38
23	Úbytek napětí na diodách D1–D3 U_D a výstupní signál optočlenu U_{OUT} v závislosti na proudu do zátěže I_Z pro optočlen 6N173 s pull-up rezistorem $4000\ \Omega$	40
24	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 13$ mA	41

25	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 2,5$ mA, pro optočlen 6N173	41
26	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 2$ mA, pro optočlen 6N173	42
27	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 1,7$ mA, pro optočlen 6N173	42
28	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 1,4$ mA, pro optočlen 6N173	42
29	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 1$ mA, pro optočlen 6N173	43
30	Výstupní signál optočlenu U_{OUT} v závislosti na proudu do zátěže I_Z a volbě pull-up rezistoru R2	43
31	Schéma zapojení měřicího obvodu s proudovým transformátorem	44
32	Výrobce udávaná závislost výstupního napětí na vstupním proudu pro proudový transformátor Talema AX-0500 [18]	45
33	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 232$ mA, pro měřicí transformátor	46
34	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 40$ mA, pro měřicí transformátor	46
35	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 15$ mA, pro měřicí transformátor	47
36	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 5$ mA, pro měřicí transformátor	47
37	Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 232$ mA, pro cívku s 50 závitů	48
38	Konstrukce magnetického relé	51
39	SSR relé MOC3041M s obvodem pro spínání v nule [16]	52
40	SSR relé v zapojení s triakem, pro spínání indukivní zátěže [17]	52
41	Rozložení vývodů mikropočítače Arduino ProMicro [20]	53
42	Zapojení mikropočítačového modulu s optočlenem BPC-817 a SSR relé	54
43	Závislost výstupní hodnoty A/D převodníku na proudu do zátěže I_Z , pro zapojení s optočlenem BPC-817	56
44	Zapojení mikropočítačového modulu s optočlenem BPC-817 a mechanickým relé	57
45	Zapojení mikropočítačového modulu s optočlenem 6N137 a SSR relé	58
46	Závislost výstupní hodnoty A/D převodníku na proudu do zátěže I_Z , pro zapojení s optočlenem 6N137	60

Seznam tabulek

1	Seznam použitých součástek a přístrojů v zapojení s optočlenem BPC-817	28
2	Seznam použitých součástek a přístrojů v zapojení s optočlenem LTV-814	35
3	Pravdivostní tabulka optočlenu BPC-817	39
4	Seznam použitých součástek a přístrojů v zapojení s optočlenem 6N137	40
5	Seznam použitých součástek a přístrojů v zapojení s optočlenem 6N137	45
6	Seznam použitých součástek a přístrojů v zapojení s optočlenem 6N137	55
7	Seznam použitých součástek a přístrojů v zapojení s optočlenem 6N137	58
8	Seznam použitých součástek a přístrojů v zapojení s optočlenem 6N137	59
9	Závislost výstupního signálu optočlenu U_{OUT} a úbytku napětí na diodách U_D na proudu do zátěže I_Z , pro optočlen BPC-817	65
10	Závislost výstupního signálu optočlenu U_{OUT} a úbytku napětí na diodách U_D na proudu do zátěže I_Z , pro optočlen 6N137	66

Seznam výpisů zdrojového kódu

1	Program pro řízení mikropočítače v zapojení s optočlenem BPC-817	67
2	Program pro řízení mikropočítače v zapojení s optočlenem 6N137	69

1 Úvod

S rostoucím trendem domácí automatizace vyvstává potřeba aktivního řízení silových domácích spotřebičů. Na trhu je dnes k dispozici mnoho proprietárních řešení v podobě takzvaných „chytrých zásuvek“. Tato řešení trpí především několika nedostatky. Prvním z nich je vysoká cena těchto zařízení, která se pohybuje v řádu tisíců korun. Druhým nedostatkem je absence jakékoliv zpětné vazby těchto spínačů. A v neposlední řadě pak špatná citlivost na velmi nízké proudy.

Zařízení, která chceme řídit nemusí být nutně v dosahu uživatele, který by zkontroloval, zdali se zařízení po sepnutí skutečně uvedlo do provozu. Typickým příkladem může být spínání domácího vytápění, kde sepnutí silového napájecího okruhu nemusí nutně znamenat uvedení do provozu. Tato práce si klade za cíl navrhnout modul, který bude nejen schopen spínat silová zařízení, ale rovněž bude poskytovat základní zpětnou vazbu o tom, zdali zařízení odebírá či neodebírá elektrický proud a to i velmi nízký v řádu miliampér.

Vzhledem k rozdílným napěťovým a proudovým úrovním mezi silovou částí spotřebiče a řídicími okruhy mikropočítače byl kladen důraz na to, aby tyto části byly navzájem galvanicky odděleny. Tato práce se zaměřuje pouze na metody, které tento požadavek splňují.

2 Metodiky snímání proudu

2.1 Přímé metody snímání proudu

Tyto metody se obvykle využívají u analogových měřících přístrojů, fungujících na principu vychylování ručičky či podobném mechanismu. Pro získání digitálních hodnot je nutné použít tyto obvody v kombinaci s některou z nepřímých metod snímání proudu. Vzhledem ke složitosti těchto obvodů a nesnadné digitalizaci signálu, nejsou tyto obvody zajímavé pro návrh jednoduchého, univerzálního měřícího obvodu. V následujícím textu tedy představím pouze základní vlastnosti.

2.1.1 Elektromagnetické přístroje

Využívají se pro měření stejnosměrných i střídavých proudů do frekvence 1,5 kHz, v rozsahu od 1 mA do 100 A. Tyto přístroje mají jednoduchou konstrukci a jsou odolné vůči přetížení.

2.1.2 Magnetoelektrické přístroje

Jsou vhodné pouze pro měření stejnosměrného proudu v hodnotách od jednotek μA do desítek A.

2.1.3 Elektrodynamické přístroje

Elektrodynamické přístroje se používají pro konstrukci wattmetrů pro stejnosměrné i střídavé proudy do 1 kHz. Jsou odolné vůči proudovému přetížení, nicméně nejsou příliš odolné vůči napěťovému přetížení a cizím rušivým magnetickým polím.

2.1.4 Indukční přístroje

Uplatňují se při konstrukci domovních měřičů spotřeby a jsou postupně vytlačovány modernějšími digitálními přístroji [1]. Mají nižší přesnost $\pm 3\%$ a vnitřní spotřebu okolo 1 VA.

2.2 Nepřímé metody snímání proudu

Nepřímé metody snímání proudu jsou takové, u kterých neměříme přímo elektrický proud, ale nějakou z odvozených veličin, velmi často napětí. Na základě této odvozené veličiny lze elektrický proud dopočítat. Elektrické napětí lze velmi snadno konvertovat na digitální signál pomocí A/D převodníků, které jsou součástí mnoha běžně dostupných měřících systémů i mikropočítačových modulů.

2.2.1 Úbytek napětí na rezistoru

Tato metoda spočívá ve snímání elektrického napětí na odporové elementu, kterým protéká neznámý elektrický proud. Tímto elementem může být přímo elektrický spotřebič, případně odpo-

rový předřadník, nebo bočník. Pokud je velikost elektrického odporu známá, můžeme s použitím Ohmova zákona vypočítat proud protékající rezistorem.

Fatálním nedostatkem této metody je fakt, že se zvětšujícím se proudem lineárně roste úbytek napětí na rezistoru, tento úbytek představuje neužitečný ztrátový výkon. Zavedení dalšího odporového prvku do obvodu také ovlivňuje přesnost měření. Lineární závislost protékajícího proudu na velikosti napětí, však může být v jistých případech výhodná.

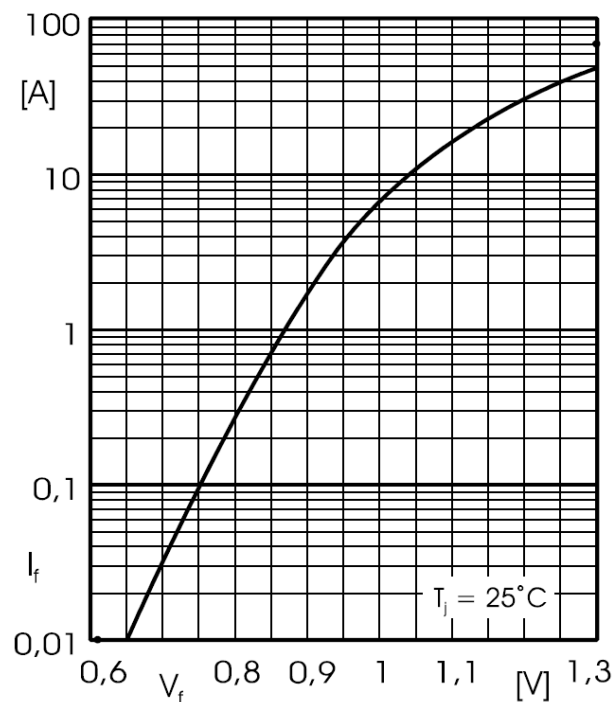
Z výše zmíněných důvodů není tato metoda vhodná pro měření proudu v silovém obvodu. Odpor měřeného spotřebiče se může výrazně lišit a použití odporového předřadníku či bočníku není možné z důvodu vysokých ztrát energie. Navíc je obtížné zvolit vhodnou velikost odporového členu, pokud by měl člen příliš nízký odpor, byl by úbytek napětí velmi těžko měřitelný, obzvláště v případě kdy se měřené proudy pohybují v rozsahu od několika miliampér do několika desítek ampér. Pokud by měl člen vysoký odpor vznikaly by na něm velké úbytky napětí.

2.2.2 Úbytek napětí na diodě

Tato metoda je koncepčně podobná metodě úbytku napětí na rezistoru, místo rezistoru je však použita polovodičová dioda. Na rozdíl od rezistoru neroste úbytek napětí lineárně se zvětšujícím se proudem, ale je omezen maximálním úbytkem napětí na diodě v propustném směru. Velikost úbytku napětí se odvíjí od typu diody, běžné křemíkové usměrňovací diody mají úbytek napětí od 0,8 V do 1,5 V, Schottkyho diody přibližně od 0,4 V do 0,8 V. Požadovanou velikost úbytku je možné zvětšit zapojením většího množství diod do série výsledný úbytek napětí bude součtem dílčích úbytků na diodách [8].

Na obrázku 1, můžeme pozorovat, že se zvětšujícím se proudem roste i úbytek napětí a to poměrně prudce. V našem případě budeme operovat v pracovní oblasti přibližně od 0,01 A do 15 A, z čehož vyplývá, že úbytek napětí poroste z počátku velmi prudce a následně se ustálí na hodnotě kolem 1 V.

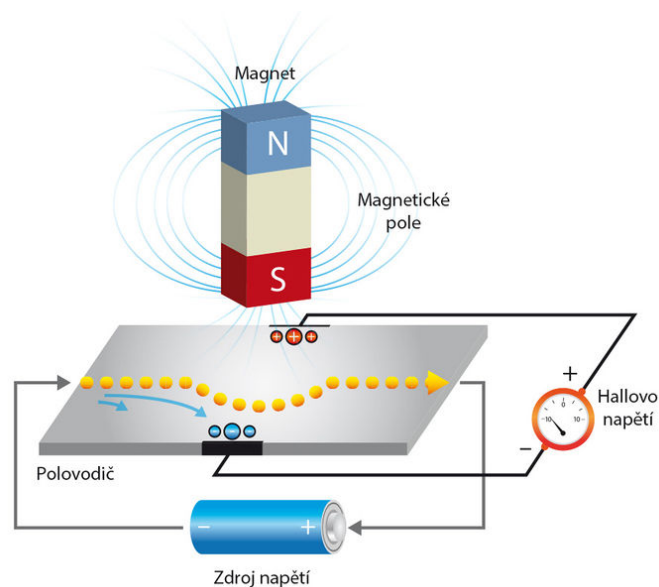
Nevýhodou této metody je, že vzhledem k nelineární závislosti proudu a úbytku napětí, je velmi obtížné určit, jak velký proud diodou protéká, obzvláště v oblasti vyšších proudů. Použití diod je tedy vhodné v případech, kdy nám stačí informace o tom, že nějaký proud protéká.



Obrázek 1: VA charakteristika úbytku napětí V_F v závislosti na proudu I_F (dioda BY550-1000) [11]

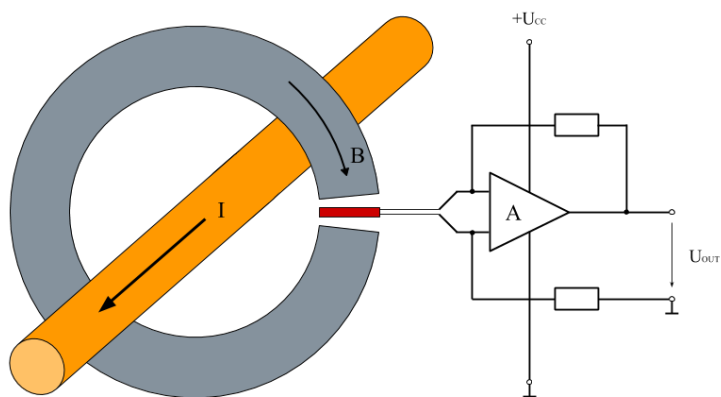
2.2.3 Hallova sonda

Tyto sondy využívají Hallova jevu pro detekci magnetického pole vyvolaného průtokem měřeného proudu vodičem v cívce. Mějme destičku z vodivého materiálu (obvykle polovodičový substrát), kterou protéká konstantní stejnosměrný proud, kolmo ke směru toku proudu působí magnetické pole vytvářené elektromagnetickou cívkou. Důsledkem toho se začne na okrajích hromadit náboj a vznikne Hallovo napětí [2][3]. Velikost Hallova napětí je přímo úměrná velikosti magnetické pole.



Obrázek 2: Hallův jev [4]

Měřicí zařízení využívající tohoto jevu se vyskytují ve dvou provedeních, s otevřenou smyčkou a s uzavřenou smyčkou. Jejich konstrukce je velmi podobná, s tím rozdílem, že měřiče s uzavřenou smyčkou jsou doplněny o kompenzační vinutí, které zvyšuje přesnost měření. Na obrázku 3 je znázorněn přístroj s otevřenou smyčkou. Proud protékající vodičem Toroidní cívkou je provlečen vodič silového vedení a ve vzduchové mezeře cívky je umístěna Hallova sonda. Vzhledem k tomu, že získané Hallovo napětí je velmi nízké, je nutné ho dodatečně zesílit.



Obrázek 3: Měřicí zařízení s otevřenou smyčkou

Výhodou těchto zařízení je vysoká linearita výstupního napětí na protékajícím proudu, nízká vlastní spotřeba, odolnost proti přetížení, schopnost měřit střídavý i stejnosměrný proud a galvanické oddělení měřicího okruhu od silových obvodů. Současné modely jsou schopny detekovat proud v řádech od jednotek miliampér do tisíců ampér, o frekvencích až 200 kHz. Cena těchto

zařízení odpovídá jejich vlastnostem a pohybuje se tedy v řádech stovek až tisíců korun, z toho důvodu nebyly využity při návrhu modulu.

3 Galvanické oddělení

Základním požadavkem při návrhu řídicího modulu pro silová zařízení bylo galvanické oddělení obvodů silového zařízení a obvodů mikropočítače, který zajišťuje detekci proudu, vyhodnocování a spínání silového okruhu. Silovým okruhem rozumíme část soustavy, která je pod sítovým střídavým napětím 230 V a mohou jí protékat proudy v řádu jednotek ampér. Naproti tomu obvody mikropočítače, zahrnující výstupy mikropočítače, indikační prvky (LED diody, displeje), ovládací prvky (tlačítka), spínací prvky a případné periferie pro komunikaci, jsou provozovány na stejnosměrném napětí 5 V (popřípadě 3,3 V dle zvoleného mikropočítače).

Na galvanické oddělení je, v tomto případě, kladen tak velký důraz, protože chceme zamezit případnému poškození mikropočítače, v případě přetížení měřeného spotřebiče, nebo náhlého výkyvu proudu. Ve spínacím obvodu galvanické oddělení chrání vstupy mikropočítače před následky magnetické indukce v cívce relé, nebo stykače.

Galvanicky oddělený obvod je takový obvod, ve kterém je výstupní elektrický obvod elektricky a fyzicky izolován od vstupního obvodu[5]. Galvanické oddělení se běžně realizuje následujícími způsoby:

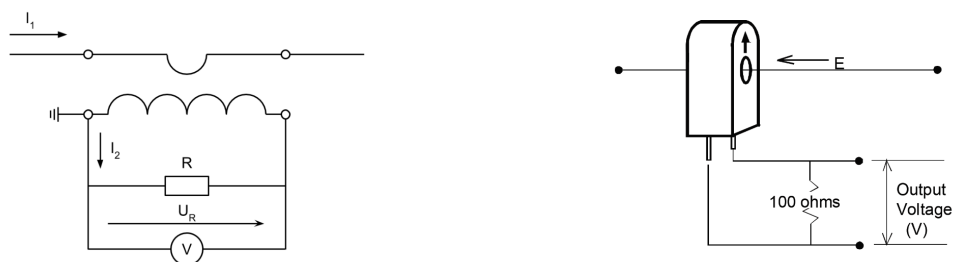
- magnetickou vazbou (oddělovací transformátor),
- světelným tokem (optočlen).

3.1 Galvanické oddělení měřícím transformátorem

Měřicí transformátory slouží ke dvěma účelům:

- Změně rozsahu měřeného střídavého proudu, zmenšením jeho velikosti.
- Galvanickému oddělení primárního a sekundárního obvodu.

Měřicí transformátor je tvořen toroidní cívkou. Primární vinutí je tvořeno silovým vedením měřeného spotřebiče, obsahuje malý počet závitů, obvykle pouze jeden. Na sekundární vinutí je připojen měřicí přístroj (ampérmetr, A/D převodník, atd.), je tvořeno větším počtem závitů [6]. Primární a sekundární vinutí není navzájem elektricky spojeno, k přenosu energie dochází magnetickou indukcí [7].



Obrázek 4: Zapojení měřicí transformátoru pro měření proudu [18]

Transformační poměr běžně dostupných transformátorů se pohybuje od 1:500 do 1:1500. Tento parametr může být limitující pro měření nízkých odběrů při nízkém napětím, napětí na sekundárním vinutí bude jen stěží detekovatelné. Proudové transformátory nejsou schopny detekovat stejnosměrné proudy.

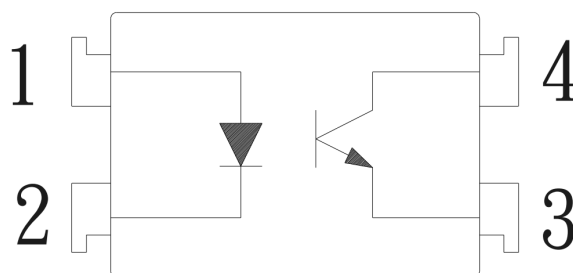
3.2 Galvanické oddělení optočlenem

Optočlen je součástka tvořena dvojicí prvků: zdrojem záření v podobě svítivé diody a detektorem záření. Oba prvky jsou uzavřeny ve společném pouzdře a není mezi nimi žádná elektrická vazba, k přenosu energie dochází pouze světelným tokem [8]. Detektor záření může být realizován mnoha způsoby:

- fotodioda,
- fototranzistor,
- hradlo,
- operační zesilovač,
- optotriak.

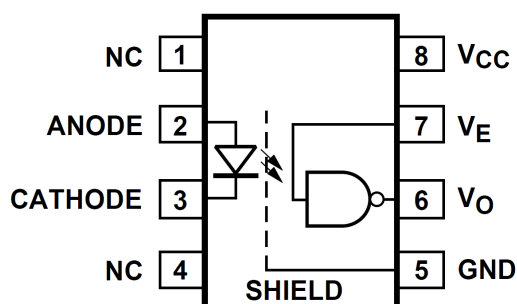
Fotodioda je polovodičová součástka, u které lze proud protékající PN přechodem řídit množstvím dopadajícího záření. V případě optočlenu je zdrojem tohoto záření svítivá dioda. Fotodioda zapojená v závěrném směru funguje jako světlem řízený elektrický odpor, takzvaný odporový režim. V propustném směru se chová jako zdroj proudu, takzvaný hradlový režim [8].

Fototranzistor využívá stejného principu jako fotodioda, množství světla dopadajícího na bázi fototranzistoru lze řídit emitorový proud. Na rozdíl od fotodiody má daleko větší citlivost na dopadající záření. Díky těmto vlastnostem je optočlen s fototranzistorem vhodný pro galvanické oddělení části pro snímání proudu od řídicího obvodu. Obrázek 5.



Obrázek 5: Optočlen s fototranzistorem [13]

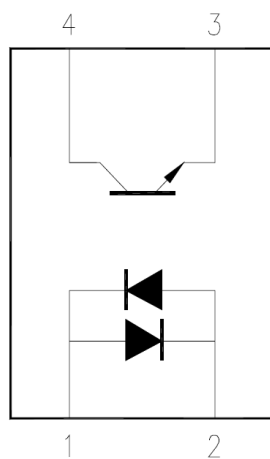
U **optočlenů s hradlem** je na výstupu realizován logický obvod, pomocí různých fotocitlivých součástek. Tyto optočleny se často využívají ke galvanickému oddělení periférií počítače, komunikačních linek, A/D a D/A převodníků. Jejich typickou vlastností je vysoká rychlost (v řádu desítek MHz) a vysoká citlivost na vstupní signál (jednotky mA). Optočleny s hradlem jsou rovněž vhodné pro galvanické oddělení silového obvodu a mikropočítače. Nevýhodou, oproti fotodiodě a fototranzistoru, je výstup pouze na dvou logických úrovních, není tedy možné, určit velikost proudu vstupní diodou. Obrázek 6.



Obrázek 6: Optočlen s hradlem NAND [14]

Optočlen s operačním zesilovačem je speciální případ optočlenu určeného pro snímání a zesílení proudu. Tyto optočleny jsou navrženy jako alternativa k měřícím transformátorům a hallovým sondám. Vzhledem k vysoké ceně těchto prvků však nejsou vhodné pro zamýšlenou realizaci modulu.

Většina optoelektronických součástek je na vstupu vybavena pouze 1 diodou, z čehož vyplývá, že na jejich vstup může být přivedeno pouze stejnosměrné napětí. Po přivedení střídavého napětí jsou na výstup převedeny pouze kladné půlvlny, navíc hrozí riziko napětového proražení diody v závěrném směru. Na trhu se však vyskytují i optočleny, s antiparalelně zapojenými diodami, schopné zpracovat rovněž střídavé průběhy napětí. Obrázek 7.



- | | |
|-------------------|--------------|
| 1. Anode, Cathode | 3. Emitter |
| 2. Cathode, Anode | 4. Collector |

Obrázek 7: Optočlen LTV-814 s antiparalelně zapojenými diodami na vstupu [15]

4 Praktické snímání proudu

Po posouzení všech možností měření proudu, blíže rozebraných v kapitole 2, byla pro finální realizaci vybrána metoda měření úbytku napětí na diodě v kombinaci s metodou měření úbytku napětí na rezistoru, tato metoda sice neumožňuje přesně určit velikost protékajícího proudu, nicméně je dostačující pro zjištění zda silovým obvodem nějaký proud protéká či nikoliv. Tyto metody samy o sobě neposkytují galvanické oddělení silové části a obvodu mikropočítače, jako prostředek pro galvanické oddělení jsem tedy zvolil tři koncepčně odlišné optočleny: PCB-817, LTV-814 a 6N137. V prvním dvou případech se jedná o optočlen se svítivou diodou na vstupu a optotranzistorem na výstupu. Třetí obvod je vysokorychlostní, TTL kompatibilní, optočen s diodou na vstupu a hradlem na výstupu. V následujícím textu porovnám jejich vlastnosti.

Otestováno bylo rovněž zapojení s měřícím transformátorem, neboť se jedná o relativně často využívanou metodu, která navíc disponuje galvanickým oddělením bez dalších přídavných optočlenů.

Metodu snímání pomocí Hallové sondy jsem se rozhodl do finální realizace nezahrnout, přestože svými technickými parametry převyšuje dříve zmíněné metody. Bohužel z důvodů vysoké ceny, těchto snímacích zařízení, a špatné dostupnosti, nesplňuje předem stanovené podmínky na nízkou cenu mikropočítačového měřícího modulu.

Z bezpečnostních důvodů nebyla měření prováděna na síťovém napětí 230 V, ale nižším bezpečným napětí 12 V, čemuž odpovídají i protékající proudy, které nepřesahují 250 mA. Výsledky by měly být stejně dobře aplikovatelné i na vyšší hodnoty proudu a napětí.

4.1 Měřicí přístroje

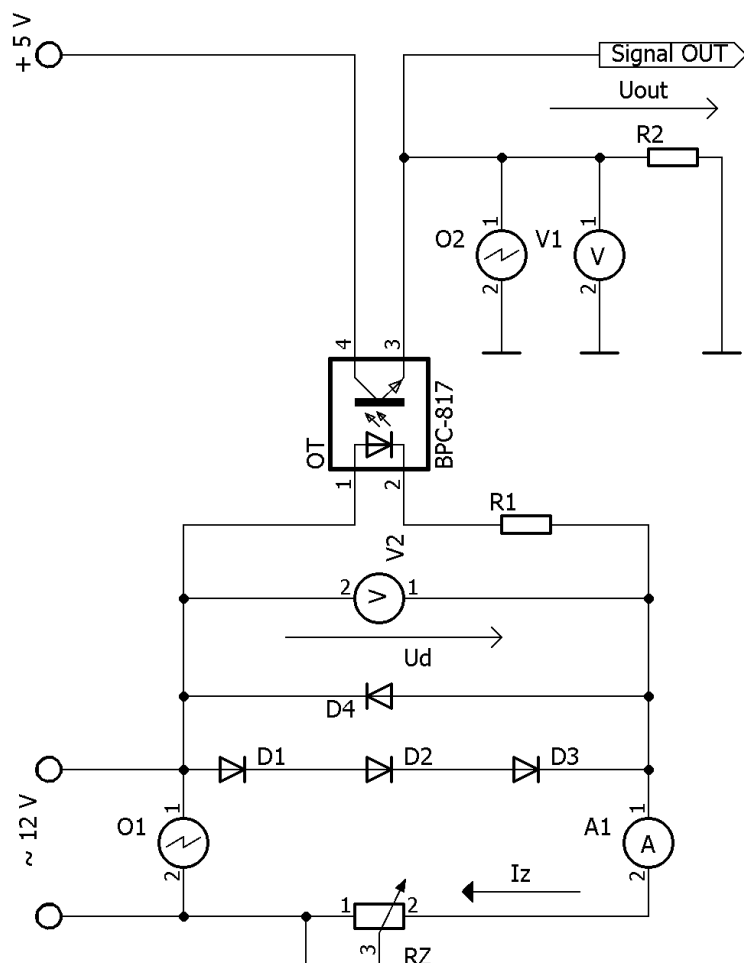
V testovacím obvodu byl jako zdroj napětí použit transformátor s výstupem 12 V, 50 Hz. Jako voltmetr V1 posloužil digitální střídavý multimetr Metex M-3660D, voltmetr V2 analogový střídavý multimetr Mastech 7002 a jako ampérmetr A1 digitální střídavý multimetr Protek 506. Pro snímání průběhů signálu byl použit dvoukanálový digitální osciloskop.

Pro simulaci odporové zátěže jsem použil sérii výkonových metal oxidových rezistorů RM56R s hodnotou 56 Ω , které jsou schopny snést výkon až 5 W. Pro nastavení vyšších hodnot odporu posloužily drátové potenciometry značky Tesla v hodnotách až 1 M Ω .

4.2 Zapojení s optočlenem BPC-817

V tomto zapojení jsem pro vytvoření úbytku napětí na silovém obvodu použil tři, do série zapojené, polovodičové usměrňovací diody. Vzhledem k tomu, že na trhu je dostupná široká škála různých polovodičových diod s velmi podobnými vlastnostmi rozhodl jsem se provést měření

s třemi odlišnými sériemi diod, abych posoudil jejich vlastnosti a určil jak velkou roli hraje volba polovodičové diody na finální funkčnosti modulu. Galvanické oddělení v tomto případě zajišťuje optočlen BPC-817. Jedná se o optočlen standardní konstrukce, na vstupu je jedna svítivá GaAs dioda, na výstupu se nachází NPN optotranzistor. Za optotranzistor je připojen snímací rezistor o velikosti $10\text{ k}\Omega$, na kterém vzniká úbytek napětí snímáný kontrolním voltmetrem, osciloskopem a samotným mikropočítačem.



Obrázek 8: Schéma zapojení měřícího obvodu s optočlenem BPC-817

4.2.1 Použité součástky

Úkolem diod D1–D3 je vytvářet úbytek napětí, na jehož základě je následně vyhodnocován proud protékající obvodem. V tomto měření jsem testoval 3 typy diod: BY550-1000, RGP30M a 1N007. Rozdíl mezi nimi je především v maximálním proudu v propustném směru, ten je 5 A, 3 A a 1 A. Mírné odlišnosti jsou také v nominálním úbytku napětí, dioda RGP30M má úbytek 1,2 V, ostatní pak standardní 1 V. Dioda D4 slouží k propuštění záporné půlvlny střídavého průběhu. Pokud by nebyla přítomna, obvodem by procházela pouze polovina průběhu střídavého proudu, navíc

by mohlo dojít k napětovému proražení citlivé svítivé diody v optočlenu. D4 byla při všech měřeních zastoupena diodou BY550-1000, neboť nemá přímý vliv na měření.

Optočlen BPC-817 od společnosti Bright LED Electronics Corp. je standardní optočlen s NPN fototranzistorem na výstupu. Proud diodou v propustném směru $I_F = 50 \text{ mA}$, otevírací napětí $U_F = 1,2 \text{ V}$. Maximální napětí na výstupním tranzistoru $U_{CE} = 35 \text{ V}$, maximální proud kolektorem $I_C = 50 \text{ mA}$, přenosový poměr tranzistoru se pohybuje v rozmezí od 50% do 600% ¹. Izolační pevnost optočlenu je 5 kV.

Odpor R1 je předřadný odpor svítivé diody optočlenu, zabraňuje přetížení popřípadě průrazu této diody, v propustném směru. Předpokladem bylo, že na diodách D1–D3 vznikne úbytek napětí přibližně 3 V, doporučené provozní napětí diody je 1,4 V, úbytek napětí U_{R1} na rezistoru R1 pak musí být dle vztahu:

$$\begin{aligned} U_{R1} &= U_D - U_{OT} \\ U_{R1} &= 3 - 1,4 \\ U_{R1} &= 1,6 \text{ V} \end{aligned} \tag{1}$$

kde U_D je úbytek na diodách D1–D3 a U_{OT} je provozní napětí diody optočlenu. Výsledný odpor předřadného rezistoru určíme dle Ohmova zákona z nominálního proudu diody I_F :

$$\begin{aligned} R1 &= \frac{U_{R1}}{I_F} \\ R1 &= \frac{1,6}{0,05} \\ R1 &= 32 \text{ } \Omega \end{aligned} \tag{2}$$

Já jsem zvolil o něco větší, 40 Ω , rezistor.

¹Přenosový poměr CTR je dán vztahem: $CTR = \frac{I_C}{I_F} * 100$

D1–D3	usměrňovací dioda	BY550-1000	5 A
D1–D3	usměrňovací dioda	RGP30M	3 A
D1–D3	usměrňovací dioda	1N007	1 A
D4	usměrňovací dioda	BY550-1000	
R1	předřadný rezistor k optočlenu		40 Ω
R2	rezistor pro měření úbytku napětí na výstupu		10 k Ω
RZ	odpor zátěže (elektrického spotřebiče)		56 - $\infty \Omega$
OT	optočlen pro galvanické oddělení	BPC-817C	
A1	střídavý ampérmetr		
V1–V2	střídavý voltmetr		
O1–O2	osciloskop		

Tabulka 1: Seznam použitých součástek a přístrojů v zapojení s optočlenem BPC-817

4.2.2 Předpoklad

Protéká-li obvodem jen velmi nízký proud, v řádu stovek mikroampér, jsou všechny diody uzavřeny. S narůstající velikostí proudu silovým obvodem dochází nejprve k pozvolnému otevření svítivé diody optočlenu, kterou protéká veškerý proud. Proud obvodem není z počátku dostatečně vysoký, aby došlo k otevření diod D1–D3.

S postupným nárůstem proudu se začínají otevírat diody D1–D3 a proud se tedy dělí mezi svítivou diodu a diody D1–D3, společně s tím roste na diodách úbytek napětí U_D .

Po překročení otevíracího napětí na diodách dojde velmi rychle k jejich saturaci a celkový úbytek napětí se ustálí na hodnotě 2,1 V až 3 V, většina proudu teče v tuto chvíli skrze diody D1–D3 a proud svítivou diodou se již nezvětšuje.

Ve chvíli kdy je na vstup přivedena kladná půlvlna průběhu střídavého proudu, jsou diody D1–D3 a svítivá dioda, polarizovány v propustném směru. Je-li proud diodou dostatečný dojde k vybuzení diody a sepnutí výstupního optočlenu, na výstupu se objeví kladný impuls.

Amplituda tohoto impulsu bude nepřímou úměrnou velikosti proudu protékajícího diodou. Je-li proud obvodem příliš nízký nedojde k úplnému otevření svítivé diody optočlenu a výstupní optotransistor přenesou pouze část půlvlny.

Záporná půlvlna střídavého průběhu prochází přes diodu D4, svítivá dioda optočlenu je v tento moment v závěrném režimu. Na výstup optočlenu je tedy přenesena pouze kladná půlvlna střídavého proudu.

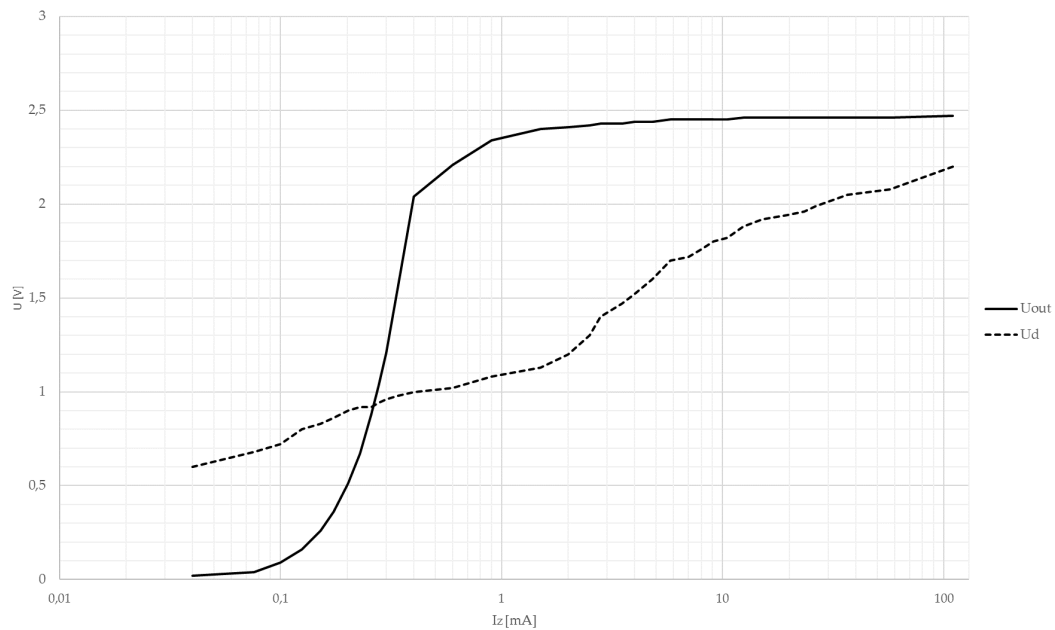
4.2.3 Měření optočlenu BPC-817

VA charakteristika na obrázku 9 zobrazuje závislost napětí U_{OUT} a U_D na proudu zátěží I_Z . Napětí U_{OUT} je úbytek na rezistoru R2 za výstupem optočlenu, měřený voltmetrem V1, toto napětí

je následně přiváděno na vstup mikropočítače a slouží k vyhodnocování hladiny protékajícího proudu. Napětí U_D představuje úbytek napětí na usměrňovacích diodách, měřený voltmetrem V2, toto napětí je přiváděno na vstup optočlenu. Napětí je měřeno střídavými měřicími přístroji, vynesené hodnoty jsou tedy efektivní hodnotou střídavého napětí. Výstupní signál má charakter obdélníkových impulzů o frekvenci 50 Hz, jehož amplituda by měla odpovídat napájecímu napětí měřicího obvodu, což je v našem případě 5 V. V charakteristice je tato výstupní hodnota přibližně poloviční, toto zkreslení je způsobeno právě střídavým měřicím přístrojem, který je navržen pro měření sinusového střídavého průběhu. Zaznamenané nelinearity v růstu napětí U_D jsou zapříčiněny nepřesným odečtem s analogového voltmetru V2, jehož minimální rozlišovací schopnost jsou 0,2 V.

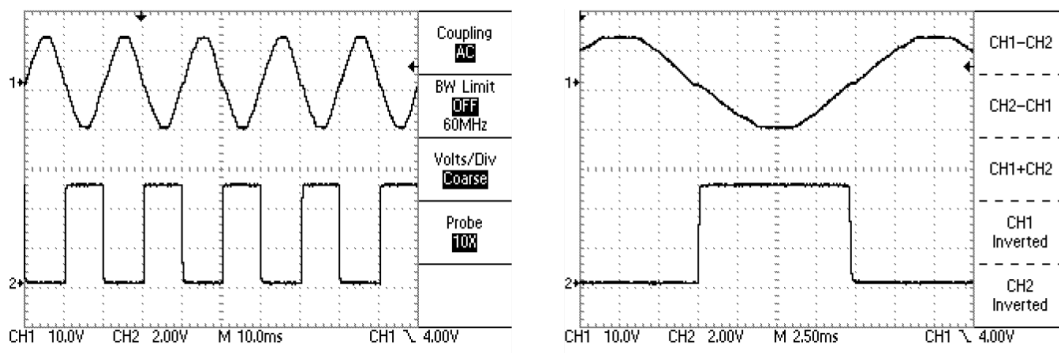
Dle specifikací optočlenu PBC-817 [13] by mělo dojít k otevření vstupní diody při napětí přibližně 1,2 V. Z výstupního napětí U_{OUT} nepřímo vyplývá, že k plnému otevření vstupní diody dochází už od 1 V, ² při tomto napětí prochází obvodem 1 mA. Z charakteristiky ovšem viditelné, že k postupnému otevírání diody, dochází už zhruba 0,2 mA.

Veškerá naměřená data jsou k dispozici v tabulce 9.



Obrázek 9: Úbytek napětí na diodách D1–D3 U_D a výstupní signál optočlenu U_{OUT} v závislosti na proudu do zátěže I_Z pro optočlen BPC-817C s usměrňovacími diodami BY55-1000

²úbytek napětí na předřadném rezistoru diody není brán v potaz.



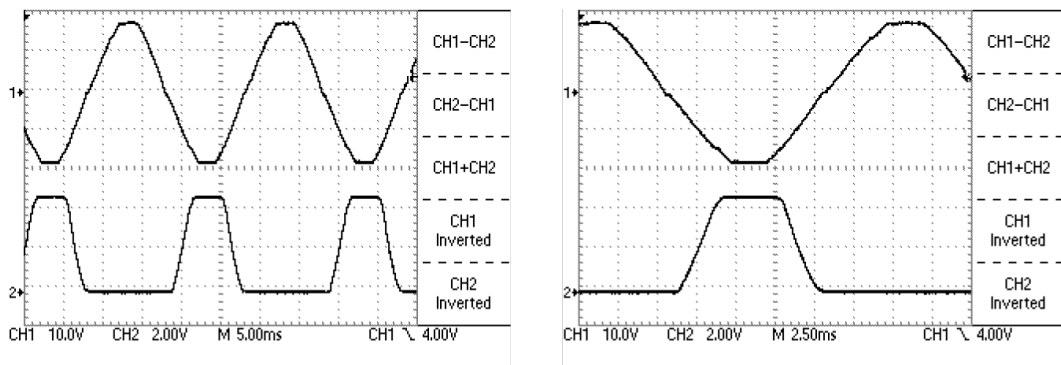
Obrázek 10: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 110$ mA, pro optočlen BPC-817

Pro přesnější zachycení přenosu byl použit dvoukanálový osciloskop, který je v obvodu vyobrazen jako O1 a O2 (kanál 1 a 2). Na následujících snímcích představuje O1 první řádek a O2 druhý řádek. Pravý snímek zachycuje detail zaznamenaného průběhu.

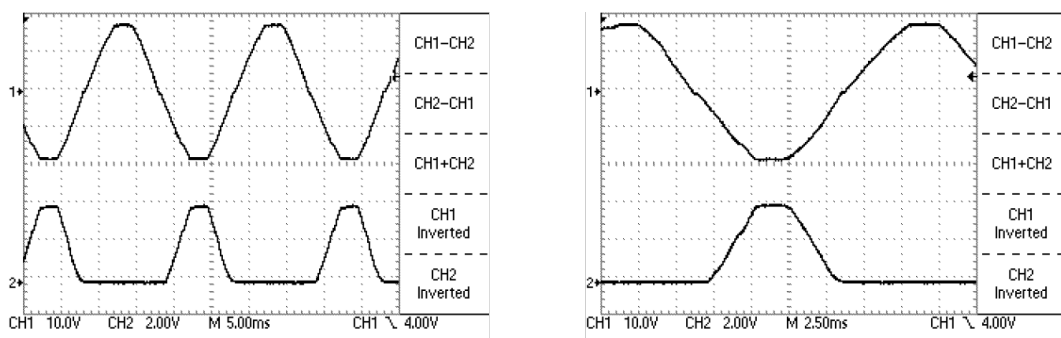
Průběh na obrázku 10 zachycuje výstupní signál v bodě kdy je optočlen plně otevřen, tedy při hodnotách proudu I_Z od 1 mA a výše. K otevření tranzistoru dochází vždy pouze v jedné půlvlně střídavého průběhu a to ve chvíli kdy je dioda optočlenu polarizována v propustném směru. Opačná půlvlna projde zpětnou diodou D4. Při této velikosti úbytku napětí a frekvenci 50 Hz, dochází k otevírání optočlenu velmi rychle, výstupem je tedy téměř obdélníkový signál.

Při proudu I_Z od přibližně 0,1 mA do 1 mA, při kterém dochází k postupnému otevírání optočlenu, vzniká výrazná deformace výstupního signálu. Napětí na diodě není dostatečně velké a k otevření optočlenu dochází až v oblasti amplitudy vstupního proudu. Z charakteristiky na obrázku 12 je patrné že dochází k zúžení impulzů a deformaci náběžné a sestupné hrany, ovšem i při $I_Z = 0,3$ mA je signál velmi dobře rozpoznatelný. Efektivní úbytek napětí na diodách je v tomto bodě 1 V, amplituda tedy dosahuje napětí až 1,4 V, dle vztahu $U_{max} = U_{ef} * \sqrt{2}$.

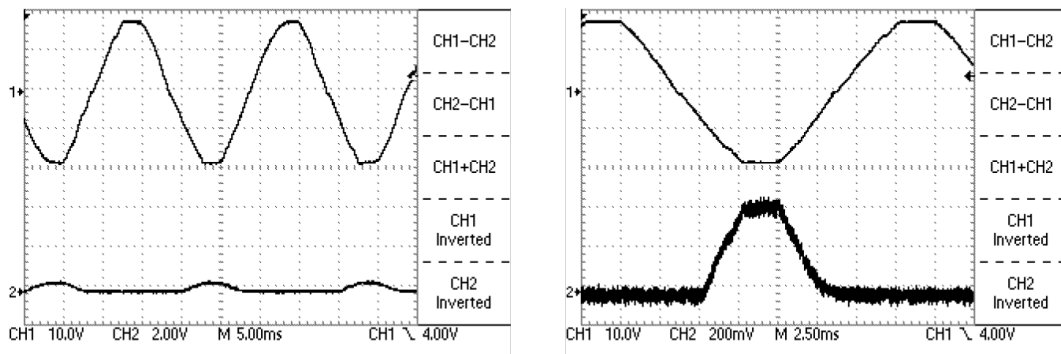
Při proudech pod 0,3 mA pak dochází k postupnému zmenšování amplitudy výstupních impulzů, neboť amplituda vstupního napětí nemá dostatečnou velikost pro otevření optočlenu. Charakteristika na obrázku 13 zachycuje stav při $I_Z = 0,1$ mA, výstupní signál je velmi úzký s amplitudou 400 mV.



Obrázek 11: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 0,4 \text{ mA}$, pro optočlen BPC-817



Obrázek 12: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 0,3 \text{ mA}$, pro optočlen BPC-817

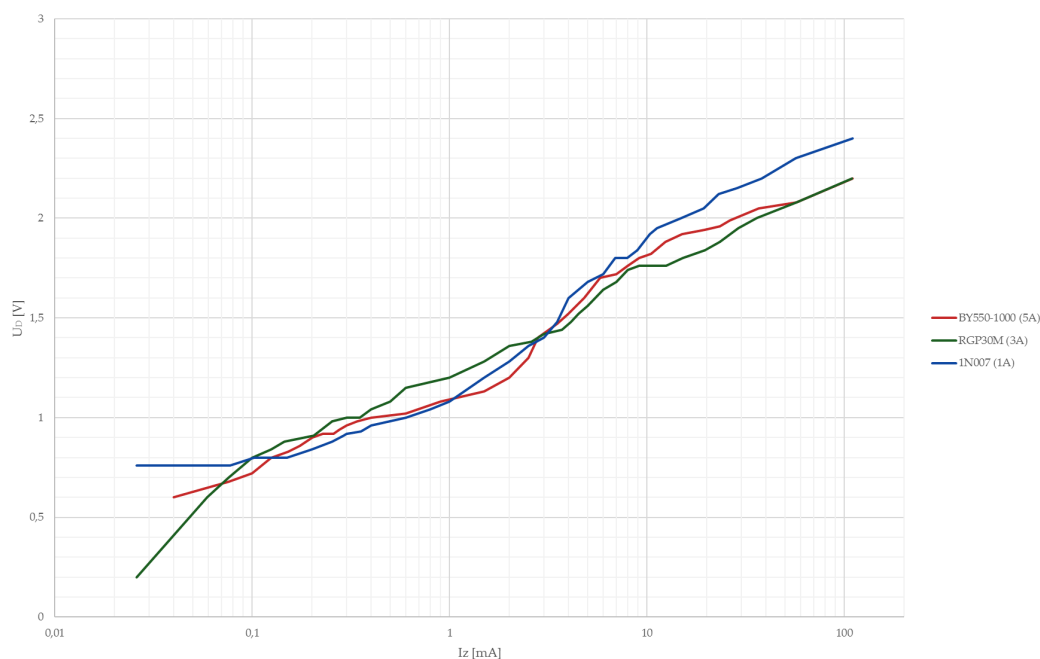


Obrázek 13: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 0,1 \text{ mA}$, pro optočlen BPC-817

4.2.4 Závislost obvodu na volbě diod

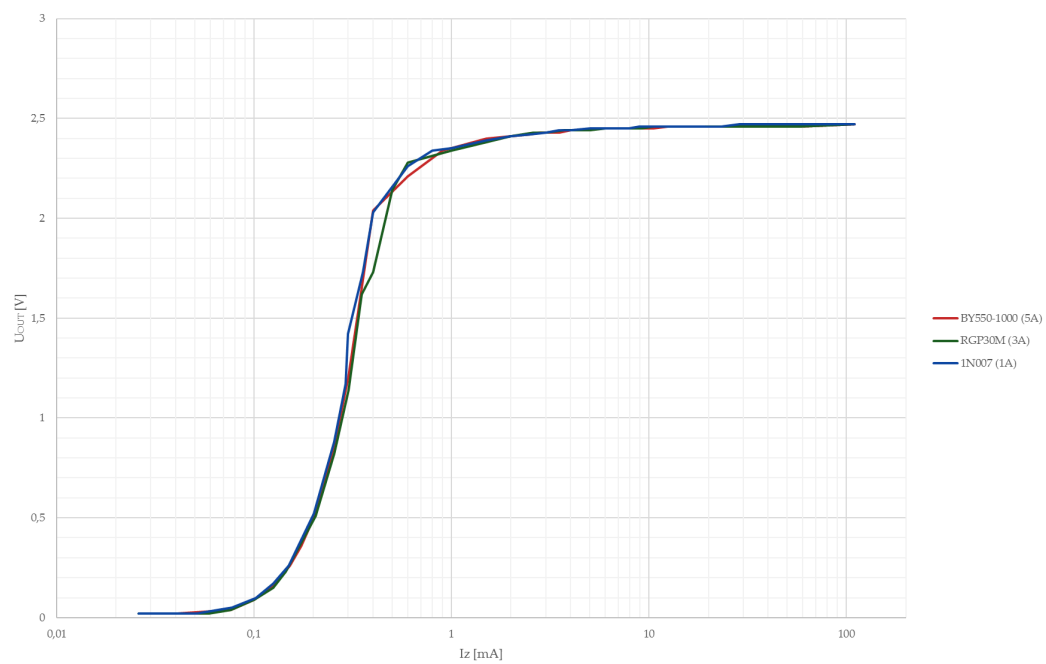
Cílem měření bylo, mimo jiné, ověřit jakou roli hraje volba diod na velikosti a nárůstu úbytku napětí. Rovněž bylo potřeba ověřit do jaké míry volba diod ovlivňuje velikost výstupního proudu.

Z charakteristiky na obrázku 14 lze vypočítat, velikost úbytku napětí roste přibližně stejným tempem, nezávisle na typu diody. Vzniklé nelinearity průběhu lze přičíst spíše špatné rozlišovací schopnosti použitého analogového voltmetru, než rozdílným vlastnostem diod. Mírnou anomálii vykazuje pouze dioda EGP30M při nízkých hodnotách proudu, příčinou toho může být odlišná velikost úbytku napětí v propustném směru, výrobcem udávaná hodnota je 1,2 V, zatímco u ostatních diod je udáván 1 V. Při vyšších proudech se však dioda chová zcela standardně a kopíruje průběh ostatních diod.



Obrázek 14: Velikost úbytku napětí v závislosti na protékajícím proudu a typu diody

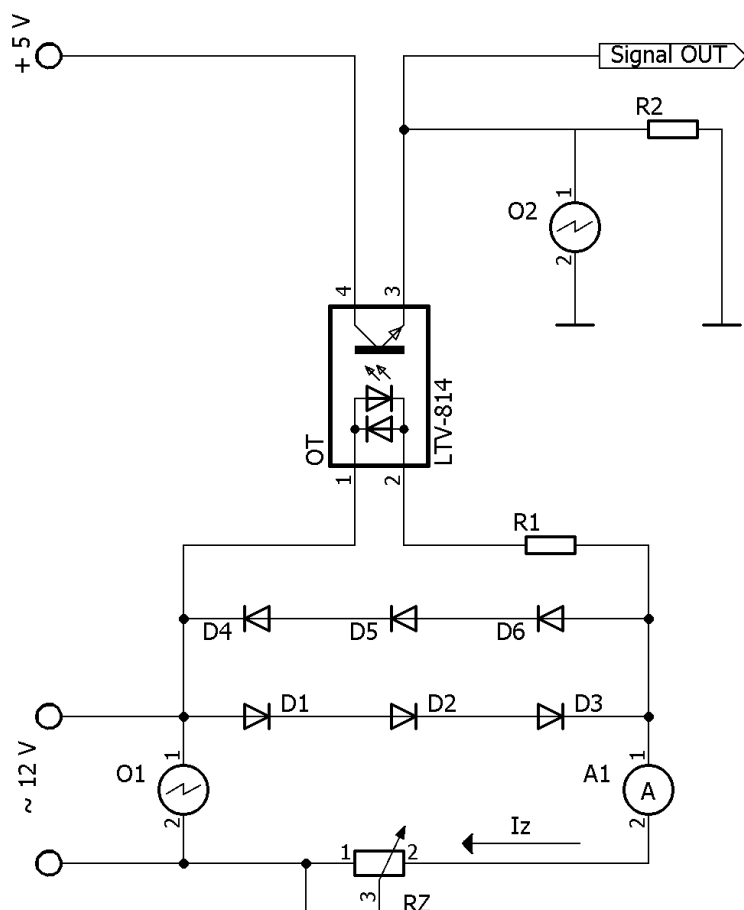
Z charakteristiky na obrázku 15 je zřejmé, že ani výstupní napětí není prakticky nijak ovlivněno použitým typem diody. Na základě těchto měření jsem vyvodil, že úbytky napětí a výstupní hodnoty nejsou zásadně ovlivněny použitým typem diody, při konstrukci modulu tedy nemusíme brát ohled na typ diody, podstatný je pouze maximální proud, který je dioda schopna propustit, aniž by došlo k jejímu poškození.



Obrázek 15: Velikost výstupního napětí v závislosti na protékajícím proudu a typu diody

4.3 Zapojení s optočlenem LTV-814

Optočlen LTV-814 má naprostou většinu provozních parametrů shodných s optočlenem BPC-817, na rozdíl od něj ovšem nemá na vstupu pouze jednu svítivou diodu, ale dvě. Diody jsou polarizovány ve vzájemně opačných směrech, díky tomu je optočlen aktivní v obou půlvlnách střídavého průběhu. Jelikož je nutné vytvářet úbytek napětí i pro opačnou půlvlnu vstupního proudu, musí být do obvodu přidány další usměrňovací diody, což výsledné zapojení komplikuje a prodražuje.



Obrázek 16: Schéma zapojení měřicího obvodu s optočlenem LTV-814

4.3.1 Použité součástky

Pro vytvoření úbytku napětí bylo použito 6 diod BY550-1000, zapojených po trojici do antiparalelního zapojení. Volba rezistorů R1 a R2 je shodná s předchozím měřením 4.2.1.

D1–D6	usměrňovací dioda	BY550-1000	5 A
R1	předřadný rezistor k optočlenu		40 Ω
R2	rezistor pro měření úbytku napětí na výstupu		10 k Ω
RZ	odpor zátěže (elektrického spotřebiče)		56 - $\infty \Omega$
OT	optočlen pro galvanické oddělení	LTV-814	
A1	střídavý ampérmetr		
O1–O2	osciloskop		

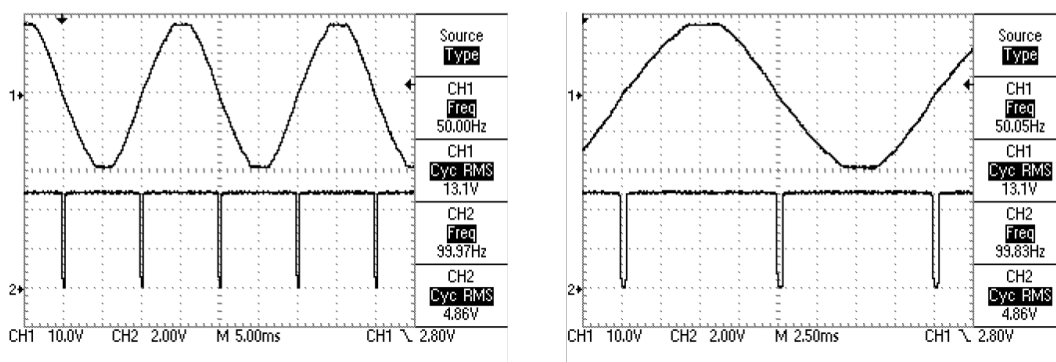
Tabulka 2: Seznam použitých součástek a přístrojů v zapojení s optočlenem LTV-814

4.3.2 Předpoklad

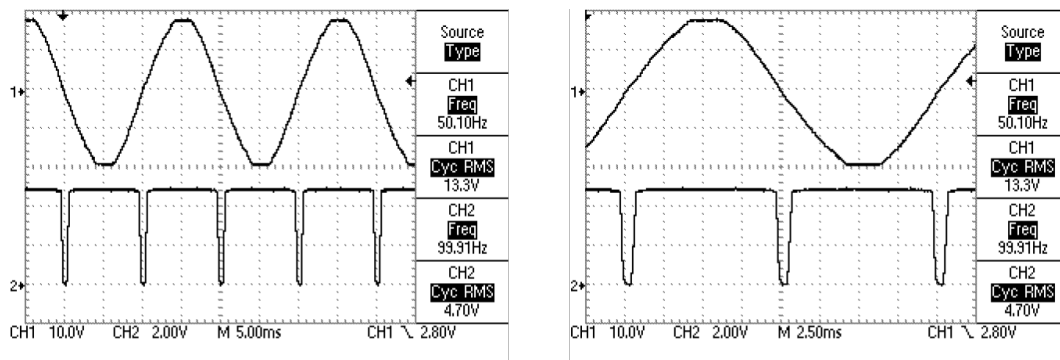
Výše zmíněný, optočlen BPC-817 disponuje na vstupu pouze jednou svítivou diodou, díky čemuž se na výstupu projevuje vždy jen jedna půlvlna měřeného proudu. Naproti tomu optočlen LTV-814 dokáže díky antiparalelně zapojeným svítivým diodám přenést obě půlvlny střídavého napětí, pokud by tedy do optočlenu přitékal dostatečně velký proud, na výstupu by se objevil konstantní signál. Tato vlastnost by usnadnila případnou detekci výstupního napětí mikropočítačem, neboť sepnutý stav by se počítači jevil jako stálá hladina napětí.

4.3.3 Měření optočlenu LTV-814

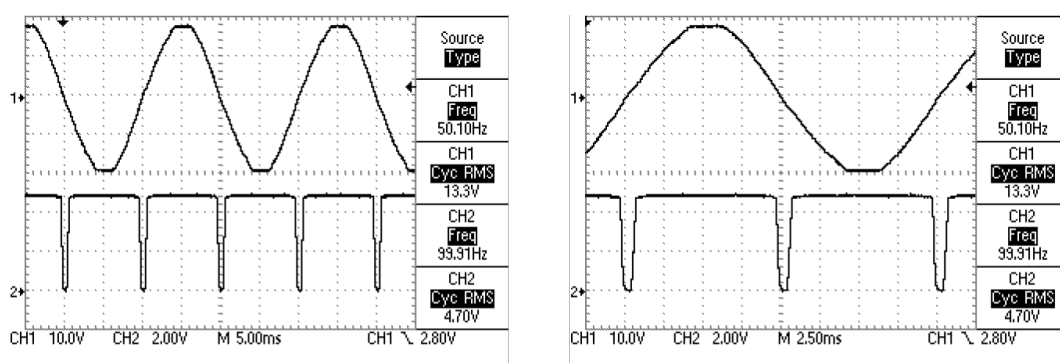
V závislosti na obrázku 17 je optočlen zachycen v plně otevřeném stavu. Optočlen spíná při obou polaritách vstupního proudu, dle předpokladu je na výstupu téměř konstantní hladina. Ke krátkému poklesu napětí dochází pouze v bodě kdy vstupní průběh prochází nulou, v tento moment není ani jedna ze vstupních diod aktivní a na přibližně 0,5 ms dojde k uzavření optočlenu. Na dobu poklesu napětí má zanedbatelný vliv rovněž šířka náběžné a sestupné hrany, která je dle výrobce maximálně 18 μs [15].



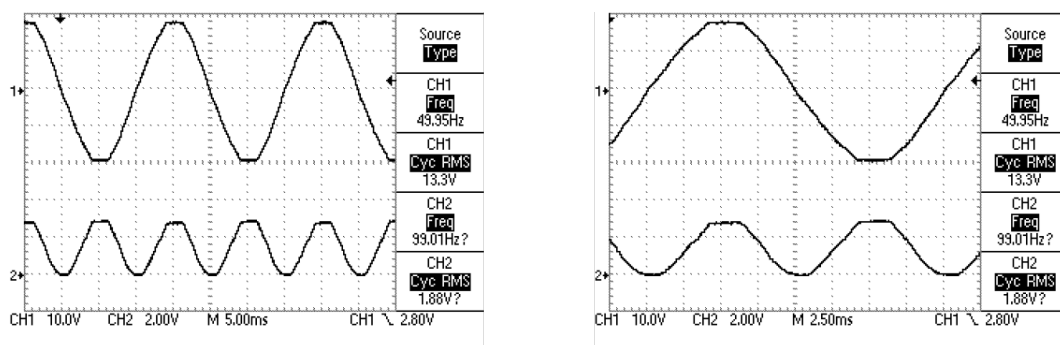
Obrázek 17: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 110$ mA, pro optočlen LTV-814



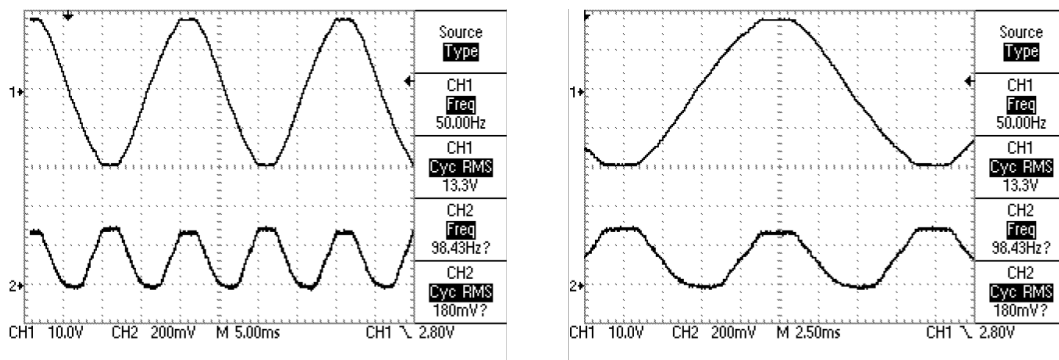
Obrázek 18: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 5 \text{ mA}$, pro optočlen LTV-814



Obrázek 19: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 1,2 \text{ mA}$, pro optočlen LTV-814



Obrázek 20: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 0,2 \text{ mA}$, pro optočlen LTV-814

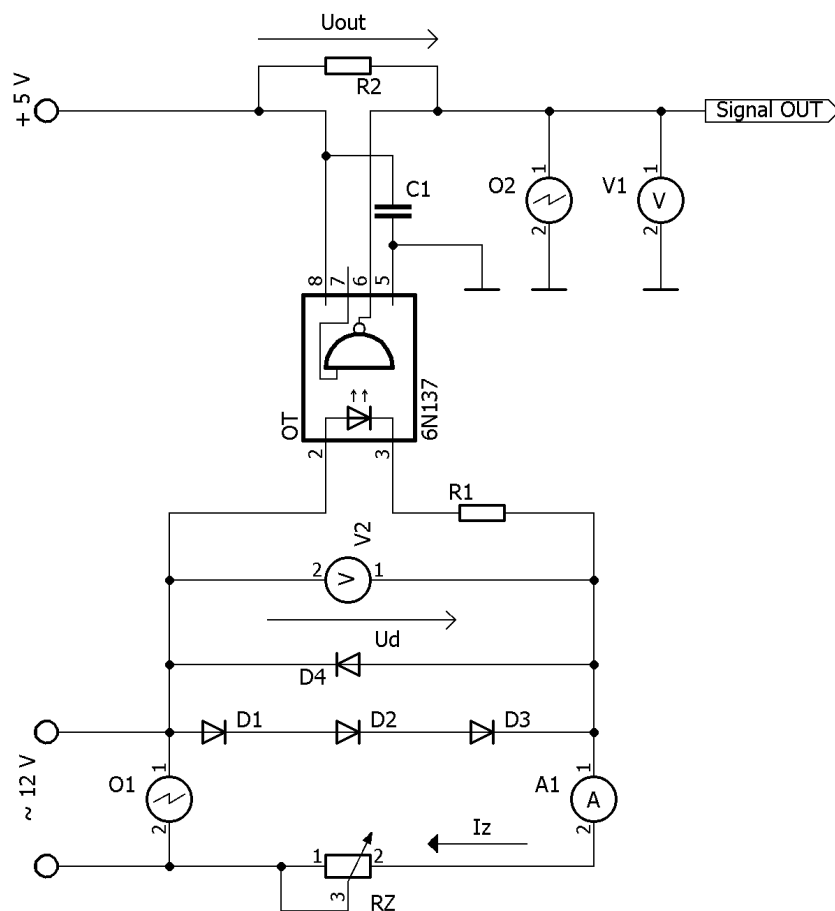


Obrázek 21: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 0,1$ mA, pro optočlen LTV-814

Stejně jako u optočlenu BPC-817 se i zde projevuje postupné snižování amplitudy a zužování impulzů, optočlen BPC-817 však vykazuje o něco lepší citlivost na nízké proudy. Konkrétně při proudu obvodem 0,1 mA přenesl TLV-814 signál o amplitudě 240 mV, zatímco u BPC-817 je to až 400 mV.

4.4 Zapojení s optočlenem 6N137

Zapojení s optočlenem 6N137 je v mnoha ohledech stejné, jako předchozí zapojení 4.2, rozdíl je v použitém prvku pro galvanické oddělení. Optočlen 6N137 je optické NAND hradlo, prvním vstupem je svítivá dioda a druhý vstup je vyveden jako řídící. Tyto obvody jsou navrženy jako galvanické oddělení pro sběrnice, A/D a D/A převodníky, periferie mikropočítače, tomu je přizpůsobeno i pracovní napětí tohoto prvku, často se označují jako TTL kompatibilní. Vzhledem ke zjištěním z předchozího zapojení z kapitoly 4.2 použijí, pro vytvoření úbytku napětí, pouze diody BY550-1000, testování ostatních diod pozbývá smysl, neboť jejich vlastnosti jsou téměř totožné.



Obrázek 22: Schéma zapojení měřícího obvodu s optočlenem 6N137

4.4.1 Použité součástky

Optočlen 6N137 od společnosti Agilent Technologies je vysokorychlostní ³, TTL kompatibilní hradlo. Otevírací proud vstupní diody $I_F = 5 \text{ mA}$, otevírací napětí $U_F = 2 \text{ V}$, napájecí napětí hradla by se mělo pohybovat v rozmezí 4,5 V až 5,5 V. Izolační pevnost prvku je 5 kV. Výsledná logická hodnota hradla je ovlivňována dvěma vstupy: vstupní diodou a vstupem Enable (v dokumentaci označen jako V_E). Výstup obvodu poté odpovídá logické funkci NAND, jak lze vidět v tabulce 3, úroveň H u vstupní LED odpovídá stavu kdy diodou protéká proud.

³Katalog udává typickou rychlost přenosu 10 MBd

vstupní LED	vstup Enable	výstup
H	H	L
L	H	H
H	L	H
L	L	H
L	nepřipojeno	L
H	nepřipojeno	H

Tabulka 3: Pravdivostní tabulka optočlenu BPC-817

Výstupní hradlo optočlenu je realizováno jako tranzistor s otevřeným kolektorem, je tedy nutné připojit k výstupu pull-up rezistor R2. Výrobce doporučena hodnota je v rozmezí 330 Ω až 4 k Ω . Abych ověřil rozdíly v chování, členu 6N137, pro různé hodnoty pull-up rezistoru, rozhodl jsem se provést měření s rezistory o hodnotě 470 Ω , 1 k Ω a 4 k Ω .

Předřadný rezistor R1 byl zvolen stejným způsobem, jako v předchozím měření, provozní napětí diody U_D jsou v tomto případě 2 V, maximální doporučená velikost proudu diodou $I_{Fmax} = 15$ mA:

$$U_{R1} = U_D - U_{OT} \quad (3)$$

$$U_{R1} = 3 - 2$$

$$U_{R1} = 1 \text{ V}$$

$$R1 = \frac{U_{R1}}{I_{Fmax}} \quad (4)$$

$$R1 = \frac{1}{0,015}$$

$$R1 = 66,6 \text{ } \Omega \approx 60 \text{ } \Omega$$

Blokovací kondenzátor C1 je připojen paralelně k napájení optočlenu a slouží k vyrovnaní proudových špiček způsobených náhlým sepnutím obvodu, jeho hodnota je, dle doporučení výrobce, 100 nF.

4.4.2 Předpoklad

Chování usměrňovacích diod v závislosti na protékajícím proudu se v ničem neliší od předchozího měření 4.2.2, odlišné je ovšem chování výstupního prvku optočlenu, výstupní NAND hradlo se nechová, na rozdíl od optotranzistoru, jako regulovatelný odpor, ale chová se jako spínač. Jakmile

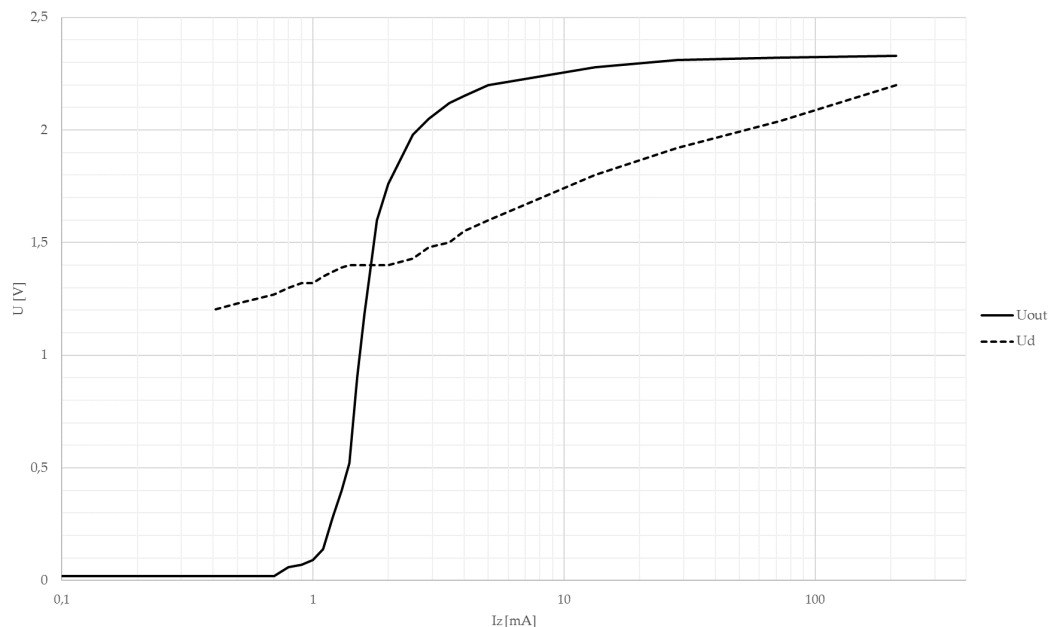
D1–D4	usměrňovací dioda	BY550-1000	5 A
R1	předřadný rezistor k optočlenu		60 Ω
R2	pull-up rezistor výstupního hradla		470/1000/4000 Ω
C1	blokovací kondenzátor		100 nF
RZ	odpor zátěže (elektrického spotřebiče)		56 - ∞ Ω
OT	optočlen pro galvanické oddělení	BPC-817C	
A1	střídavý ampérmetr		
V1–V2	střídavý voltmetr		
O1–O2	osciloskop		

Tabulka 4: Seznam použitých součástek a přístrojů v zapojení s optočlenem 6N137

proud vstupní diodou přesáhne hodnotu přibližně 5 mA [14], je vstup vyhodnocen jako H. Pokud je zároveň na vstupu Enable přivedena úroveň H, dojde k překlopení hradla.

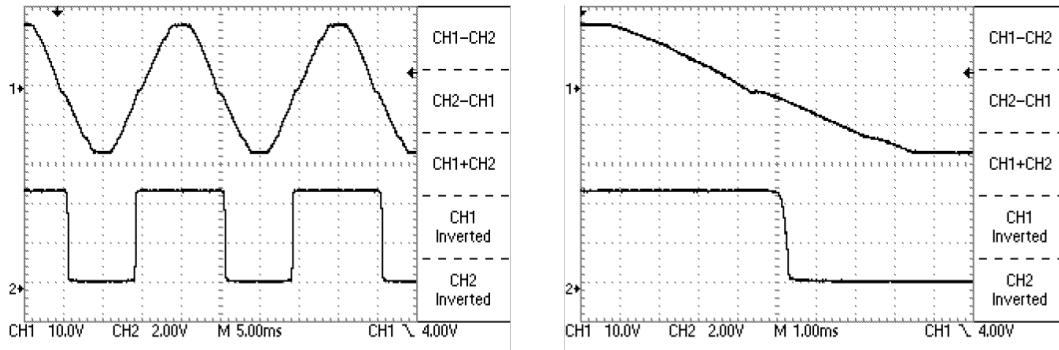
4.4.3 Měření optočlenu 6N137

VA charakteristika na obrázku 23, zobrazuje stejně jako v předchozím měření závislost napětí U_{OUT} a U_D na proudu zátěží I_Z . Otevírací napětí optotranzistoru 6N137 je vyšší než u předchozího BPC-817, ke strmému otevření dochází ve chvíli, kdy diodami prochází zhruba 2 mA, v tomto stavu výstupní hradlo přenáší na výstup pouze část půlvlny střídavého průběhu. K úplnému přenosu půlvlny dochází až po překročení 5 mA. Kompletní soubor naměřených dat je k dispozici v tabulce 10.



Obrázek 23: Úbytek napětí na diodách D1–D3 U_D a výstupní signál optočlenu U_{OUT} v závislosti na proudu do zátěže I_Z pro optočlen 6N137 s pull-up rezistorem 4000 Ω

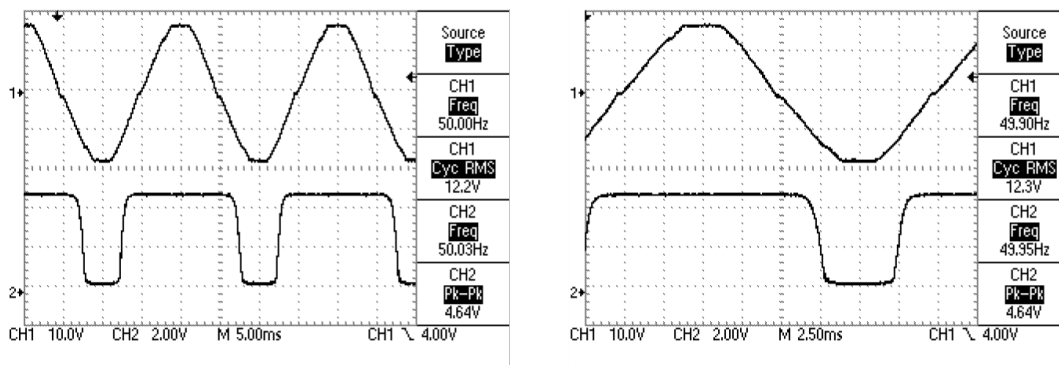
Vzhledem k povaze výstupního obvodu mají daleko větší vypovídací hodnotu výstupy z osciloskopu. Obrázek 24 zachycuje stav kdy je optočlen plně otevřen a na výstup přenáší celou půlvlnu střídavého průběhu. Vzhledem k tomu, že se obvod chová jako hradlo NAND je signál inverzní, je-li na vstupu Enable hodnota H a zároveň na vstupu ze svítivé diody hodnota H, je výstup v úrovni L.



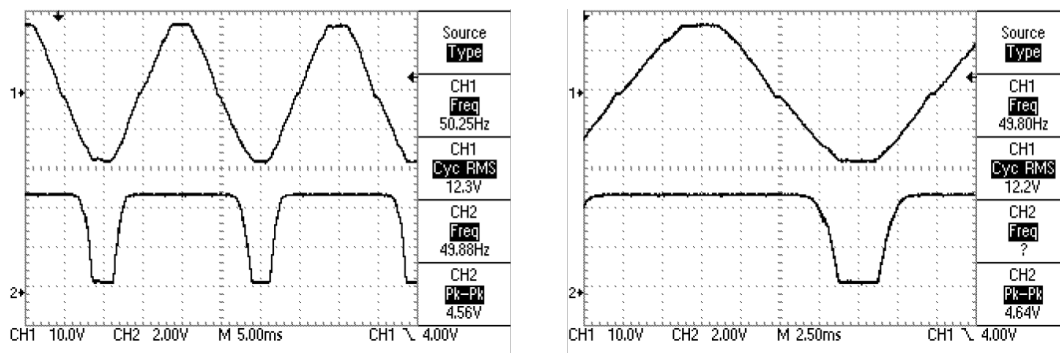
Obrázek 24: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 13 \text{ mA}$

Při poklesu proudu I_Z pod úroveň 5 mA dochází k zužování impulsů směrem k amplitudě vstupního signálu. Velikost vstupního signálu je dostatečně velká pro překlopení hradla přibližně do hladiny 2 mA , z charakteristiky na obrázku 26 je patrné, že impulsy jsou úzké, stále ovšem zřetelně rozeznatelné.

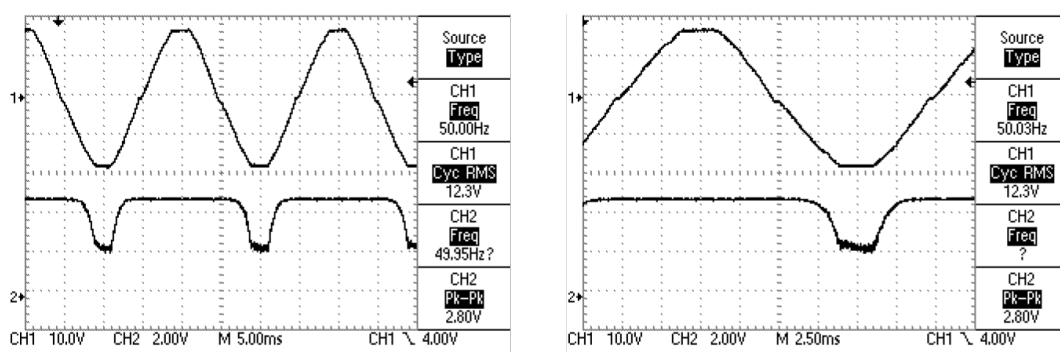
Při proudech pod 2 mA již amplituda vstupního proudu nestačí k úplnému překlopení hradla a signál je tedy zkreslen. V průběhu na obrázku 27 a 29 je vidět prudká degradace signálu, při hodnotě $I_Z = 1 \text{ mA}$ je signál už stěží rozeznatelný.



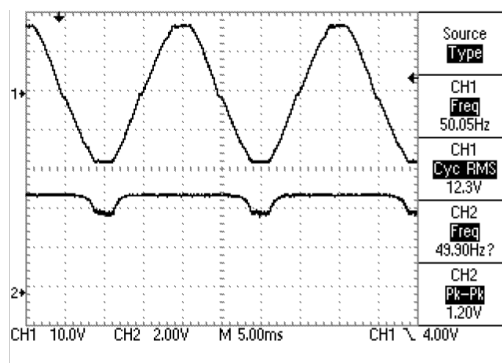
Obrázek 25: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 2,5 \text{ mA}$, pro optočlen 6N173



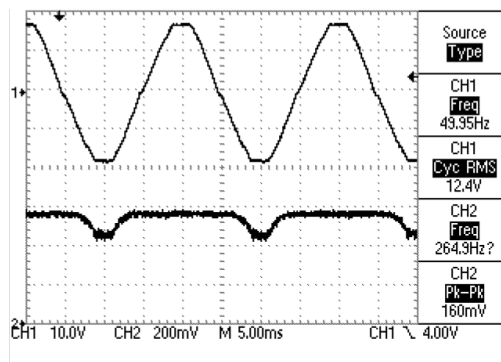
Obrázek 26: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 2 \text{ mA}$, pro optočlen 6N173



Obrázek 27: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 1,7 \text{ mA}$, pro optočlen 6N173



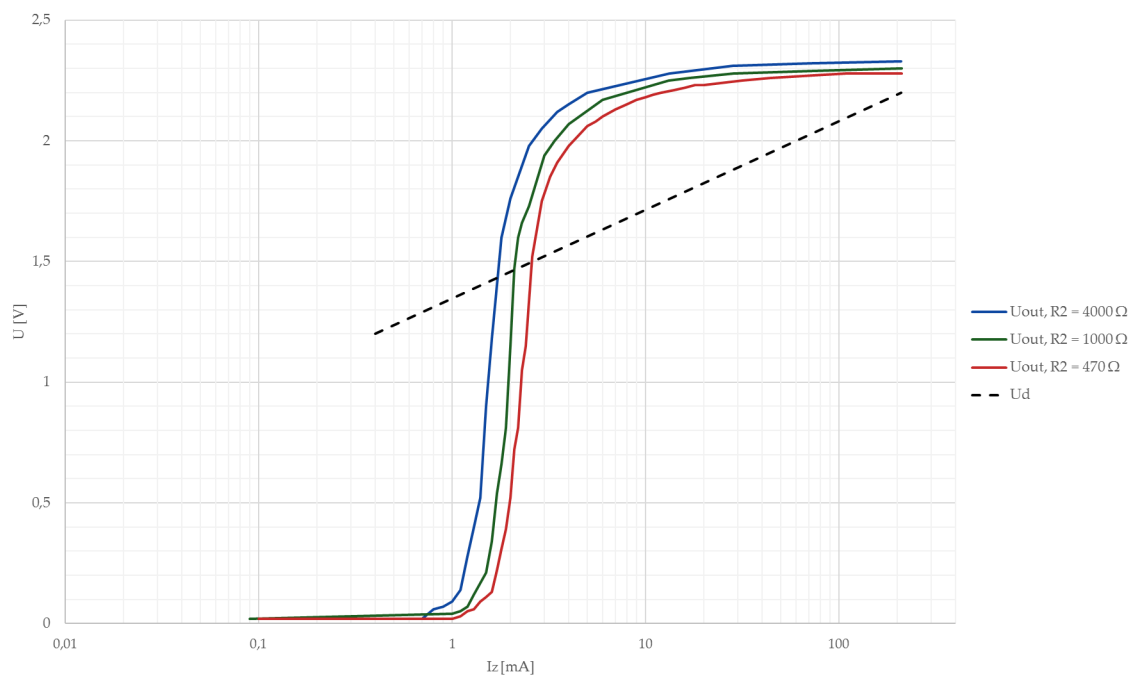
Obrázek 28: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 1,4 \text{ mA}$, pro optočlen 6N173



Obrázek 29: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 1$ mA, pro optočlen 6N173

4.4.4 Závislost obvodu na volbě pull-up rezistoru R2

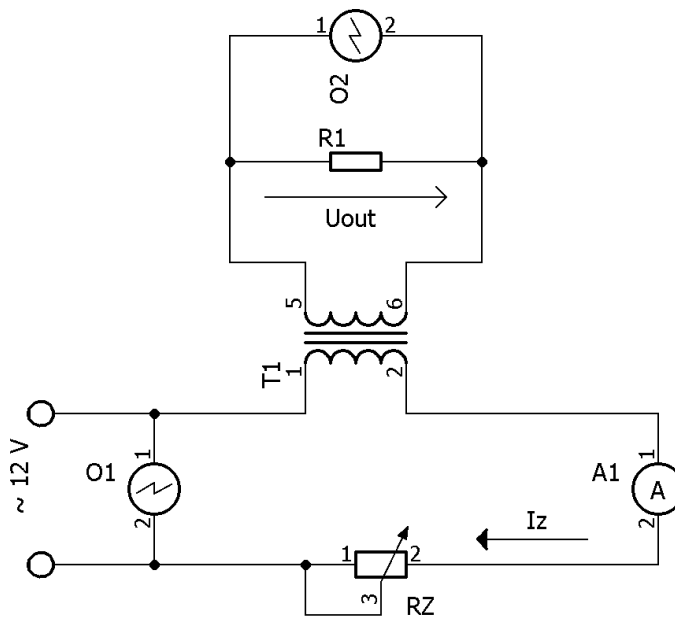
Velikost spínacího proudu ovlivňuje zvolený pull-up rezistor, výrobce doporučuje jeho hodnotu volit v rozmezí 333Ω až 4000Ω . Při vyšších hodnotách rezistoru je hradlo citlivější na protékající proud, na rezistoru však dochází k většímu úbytku napětí, což je ale v našem případě irrelevantní. Pro předchozí měření byla tedy zvolena maximální doporučená hodnota 4000Ω . Na obrázku 30 lze pozorovat rozdílnou citlivost optočlenu na proud I_Z , pro různé hodnoty pull-up rezistoru.



Obrázek 30: Výstupní signál optočlenu U_{OUT} v závislosti na proudu do zátěže I_Z a volbě pull-up rezistoru R2

4.5 Zapojení s měřícím proudovým transformátorem

Měřicí transformátory jsou častým nástrojem pro měření proudu, jak u „kutilských“ instalací tak i v profesionálních měřících zařízeních. Výhodou je galvanické oddělení a lineární závislost výstupního napětí na protékajícím proudu. Problémem je, že většina běžně dostupných transformátorů disponuje poměrně nízkými transformačními poměry od 500:1, následkem toho je velmi obtížná detekce nízkých proudů.



Obrázek 31: Schéma zapojení měřícího obvodu s proudovým transformátorem

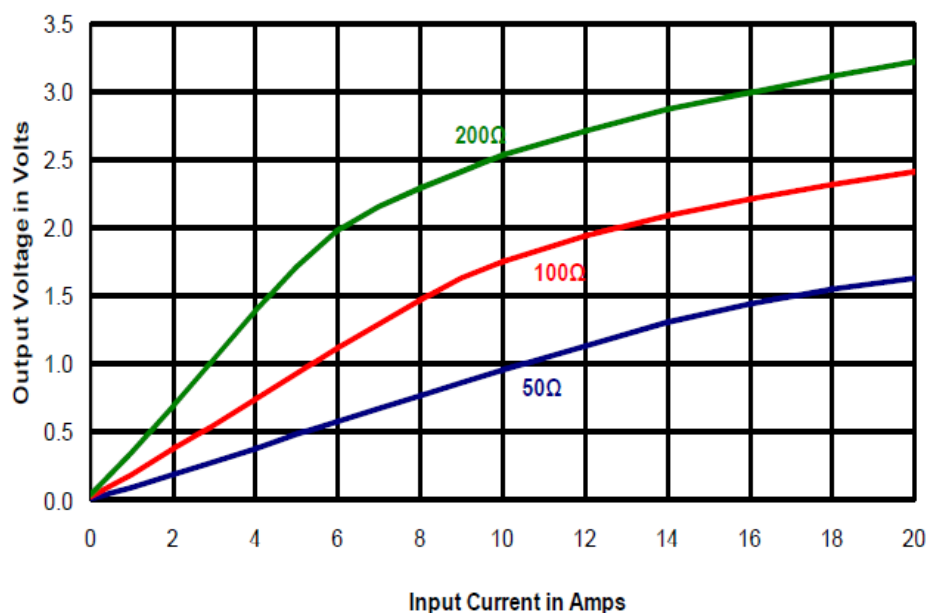
4.5.1 Použité součástky

V testovaném zapojení byl použit měřicí transformátor Talema AX-0500. Jedná se o transformátor pro síťovou frekvenci 50/60 Hz, s měřícím poměrem 500:1. Výrobce deklaruje lineární závislost vstupního napětí na vstupním proudu do hodnoty 5 A, jak lze vidět na obrázku 32.

Pro snímání napětí na výstupu transformátoru slouží rezistor R1, jehož hodnotu jsem, přes doporučení výrobce, zvolil na 1000 Ω . Výrobce doporučuje, dle charakteristiky na obrázku 32, používat odpor nejvýše 200 Ω , se zvyšujícím se odporem dochází k deformaci linearitu při nižším průtoku proudu, zároveň je však možné snímat i nižší proudy. Jelikož cílem bylo ověřit schopnost detekovat velmi nízké proudy, rozhodl jsem se oželeť lineární výstupní charakteristiku při vyšších hodnotách proudu.

R1	rezistor pro měření úbytku napětí na výstupu		1000 Ω
RZ	odpor zátěže (elektrického spotřebiče)		56 - ∞ Ω
T1	proudový transformátor	Talema AZ-0500	$I_{max} = 5$ A
O1–O2	osciloskop		

Tabulka 5: Seznam použitých součástek a přístrojů v zapojení s optočlenem 6N137



Obrázek 32: Výrobce udávaná závislost výstupního napětí na vstupním proudu pro proudový transformátor Talema AX-0500 [18]

4.5.2 Měření s transformátorem AX-0500

Při vyšších hodnotách proudu, v řádu desítek miliampér, je výstupní signál zcela zřetelný, i když se zde projevuje jisté zvlnění a fázový posuv, které jsou pravděpodobně důsledkem použitého rezistoru a vlastností cívky. Ověříme zda předpokládaná hodnota velikost napětí na rezistoru R1 odpovídá naměřené hodnotě, z obrázku 33, při proudu $I_Z = 232$ mA. Vypočteme převod proudu s primární cívky na sekundární:

$$\frac{500 : 1}{0,232 : 0,464 * 10^{-3}} \quad (5)$$

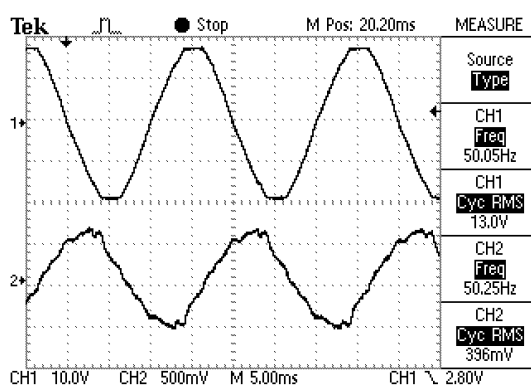
Na základě převodového poměru 500:1 je očekávaný výstupní proud 0,464 mA, následně určíme úbytek napětí na rezistoru 1000 Ω :

$$U = R * I \quad (6)$$

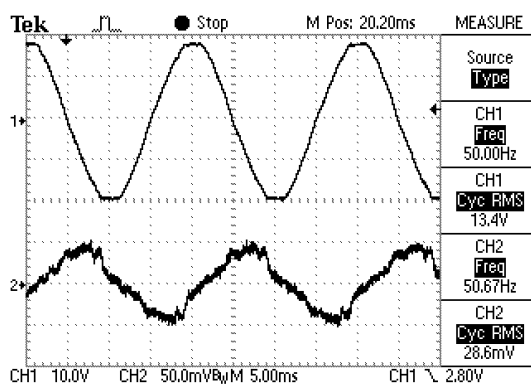
$$U = 1000 * 0,464 * 10^{-3}$$

$$U = 464 \text{ mV}$$

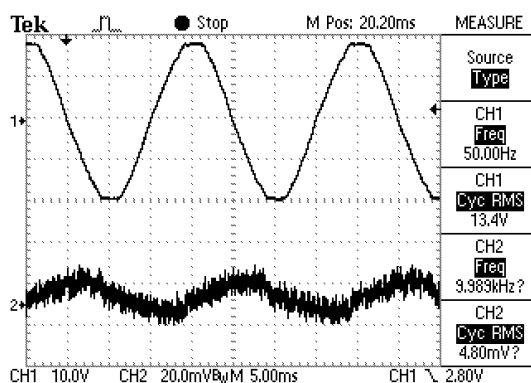
Výsledná hodnota přibližně odpovídá amplitudě signálu z charakteristiky na obrázku 33, osciloskop udává hodnotu 396 mV, nicméně vzhledem ke zvlnění signálu nelze tuto hodnotu považovat za zcela přesnou.



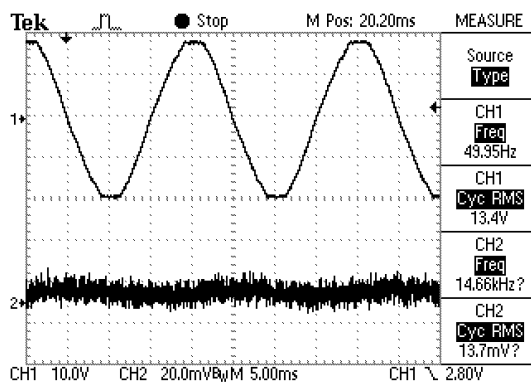
Obrázek 33: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 232 \text{ mA}$, pro měřicí transformátor



Obrázek 34: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 40 \text{ mA}$, pro měřicí transformátor

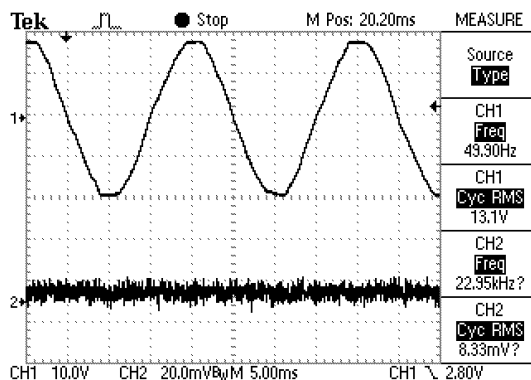


Obrázek 35: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 15$ mA, pro měřicí transformátor



Obrázek 36: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 5$ mA, pro měřicí transformátor

Z charakteristik je patrné, že se snižujícím se proudem převládá ve výstupním signálu šum nad užitečným signálem. Hranici, od které už není možné užitečný signál rozlišit, je obtížné stanovit přesně, nicméně v tomto případě to bylo přibližně 15 mA. Pro porovnání jsem provedl také měření s běžnou cívkou o 50 závitů, obtočenou kolem silového vedení, obrázek 37, avšak i při proudech nad 230 mA jsem zachytil pouze šum.



Obrázek 37: Závislost průběhu vstupního napětí a výstupního signálu, při proudu $I_Z = 232$ mA, pro cívku s 50 závitů

4.6 Závěr měření

Cílem měření bylo především ověřit, nakolik použitelné jsou jednotlivé metody pro měření malých proudových úrovní. Zapojení s optočleny BPC-817 a TLV-814 si vedla velmi podobně. Oba optočleny fungují na stejném principu, TLV-814 ovšem dokáže zpracovat obě půlvlny střídavého průběhu. Tyto prvky byly, v testované konfiguraci, schopny zaznamenat proud již od 0,1 mA, což se na výstupu obvodu projevilo, jako impulzy o amplitudě 200 mV (v případě optočlenu BPC-817). Mnohé mikropočítačové moduly jsou vybaveny 10 bitovými A/D převodníky, jejichž minimální rozlišovací schopnost se, při referenčním napětí 5 V, pohybuje na hodnotě 4,9 mV. Při měření s optočlenem BPC-817 jsem zároveň ověřoval, jaký vliv má volba diod na přesnost snímání. Z měření 4.2.4 vyplynulo, že rozdíly mezi jednotlivými diodami jsou minimální a pohybují se v rozsahu odchylky měřících přístrojů. Zásadní výhodou této metody je nízká cena (optočlen BPC-817 a 4 diody se dají pořídit za 18 Kč) a schopnost detekce i velmi nízkých proudů. Na druhou stranu toto řešení neumožňuje určit přesnou velikost protékajícího proudu, neboť přenosová charakteristika optočlenu je nelineární a proud optočlenem se od určitého proudu již nezvyšuje.

Optočlen 6N137 jsem do testování zařadil především z toho důvodu, že poskytuje digitální výstup, při překročení určité hladiny proudu dojde k jeho překlopení. Díky tomu je možné použít mikropočítač, který nedisponuje A/D převodníkem. Citlivost tohoto optočlenu je ovšem o řád horší, než v případě řešení s BPC-817, na výstupu 6N137 lze zaznamenat signál od proudu 1 mA. Abychom tento signál mohli považovat za digitální musí obvodem protékat přinejmenším 2 mA. Nevýhodou tohoto řešení je, stejně jako v předchozím případě, nemožnost detekovat lineárně nárůst proudu.

Poslední testované zapojení s měřícím transformátorem je v praxi využíváno pravděpodobně nejčastěji. Jeho hlavní výhodou je, že se v určitém proudovém rozsahu chová lineárně, lze tedy určit přesnou hodnotu proudu tekoucího silovým okruhem. Na rozdíl od předchozích metod zde

také nevzniká žádný úbytek napětí v silové části. Problémem je nízká citlivost na protékající proud. Tyto součástky jsou navrženy pro detekci proudu v řádu stovek miliampér až stovek ampér. Testovaný transformátor AX-0500, s převodovým poměrem 500:1, vytvářel při zatížení 15 mA výstupní napětí 5 mV, což je již na hranici detekovatelnosti. S klesajícím proudem se navíc na výstupu velice výrazně projevuje šum. Abychom mohli signál považovat za zřetelně rozpoznatelný musí obvodem protékat přibližně 40 mA.

5 Metody spínání obvodů

V silnoproudé elektrotechnice se používá široké spektrum spínacích součástek: magnetické spínače, polovodičové prvky, pneumatické spínací prvky, spínače s mechanickým pohonem atd. Volba závisí především na spínaných výkonech a vnějších podmínkách. Cílem této práce není analyzovat všechny možnosti spínání, proto se v následující kapitole zaměřím pouze na několik základních běžně používaných metod.

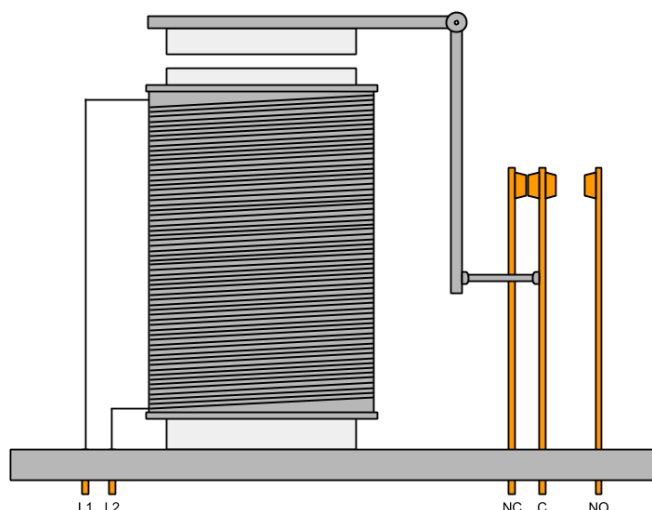
5.1 Elektromagnetické relé

Relé patří, společně se stykačem, do skupiny mechanických spínacích prvků řízených elektromagnetickou cívkou. Princip funkce je u obou součástek schodný, stykače jsou ovšem obecně konstruovány pro vyšší proudy, disponují pomocnými kontakty a napětí spínacího obvodu bývá obvykle 24 V a vyšší. Relé jsou konstruovány pro spínání nižších proudů, v řádu desítek ampér, používají se v řídicích obvodech, někdy i v kombinaci se stykači. Relé se vyrábějí v provedení s napájením spínacího obvodu napětím od 3 V, časté jsou rovněž typy se spínacím napětím 5 V DC, což usnadňuje použití v kombinaci s mikropočítačovými moduly.

Výhodou relé je galvanické oddělení spínací cívky od spínaného obvodu, vysoké spínací proudy, jednoduchá konstrukce a nízká cena. Na druhou stranu relé mají vyšší vlastní spotřebu v sepnutém stavu a mechanické prvky limitují rychlost spínání a počet spínacích cyklů. Problematické je rovněž připojení indukčních prvků k výstupům mikropočítačů, spínací cívka vytváří při rozpínání indukovaný proud, který může poškodit výstupy mikropočítače. Z toho důvodu je nutné používat relé v kombinaci s jiným polovodičovým či optoelektrickým prvkem.

5.1.1 Princip funkce

Relé se skládá z cívky spínacího obvodu, pohyblivé kotvy a pohyblivých kontaktů. Ve vypnutém stavu, pokud není na vstupy L1 a L2 přivedeno napětí, jsou vodivě spojeny spínací kontakty NC a C. Po přivedení napětí na vstupy L1 a L2, a překročení spínacího napětí, dojde ke zmagnetizování jádra cívky, které přitáhne pohyblivou kotvu. Kotva mechanicky přestaví spínací kontakty do stavu, kdy jsou vodivě spojeny vstupy NO a C. Relé běžné konstrukce setrvává v sepnutém stavu, pouze pokud je na cívku přivedeno napětí.



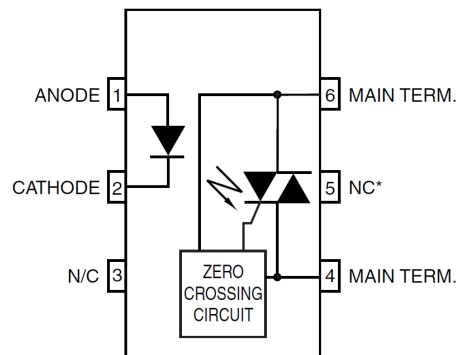
Obrázek 38: Konstrukce magnetického relé

5.2 SSR relé

SSR relé, neboli Solid State Relay, je označení pro spínací prvky bez pohyblivých mechanických součástí, roli spínacího prvku zde zastupují polovodičové součástky. Aby bylo dosaženo galvanického oddělení spínacího obvodu a silové části, jsou tyto součástky v drtivé většině případů realizovány pomocí optoelektrických prvků. Přestože opět existuje celá řada možných realizací, většina relé využívá jako spínací prvek triak, nebo tranzistor MOSFET. SSR relé s tranzistory MOSFET jsou vhodné pouze pro spínání malých výkonů (do 1 W).

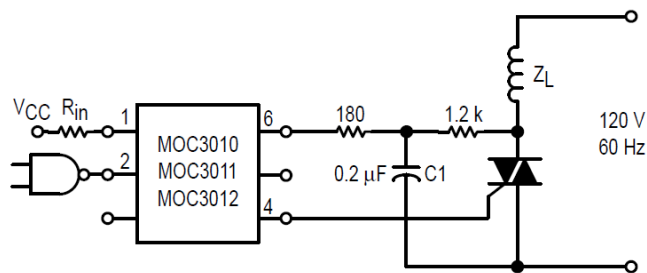
SSR relé odstraňují některé z podstatných nedostatků mechanických relé a to zejména rychlost spínání, mechanické opotřebení a vznik oblouků a jiskření. Toto řešení má však i jisté nedostatky, zejména: vzniklý úbytek napětí na polovodičových součástkách způsobuje zahřívání, výstup nelze udržet sepnutý při libovolně malém napětí a proudu. Většina SSR relé je konstruována pouze pro spínání střídavých proudů, k rozepnutí těchto relé je nutné, aby triakem protékal nulový proud, tato podmínka ovšem není u stejnosměrného napětí splněna a SSR relé zůstává sepnuté i po odpojení napájení na vstupu.

Důležitým parametrem SSR relé je vlastnost spínání v nule, což znamená, že ke spínání a rozpínání dochází v oblasti kdy spínané napětí prochází nulou, díky čemuž jsou minimalizovány proudové nárazy a VF rušení.



Obrázek 39: SSR relé MOC3041M s obvodem pro spínání v nule [16]

Častou alternativou k drahým výkonovým SSR relé je zapojení v kombinaci s klasickým triakem [22]. Na obrázku 40. Ceny triaků, pro proudy větší než 10 A, začínají přibližně na 30 Kč. SSR relé stejných vlastností se pohybuje v cenové hladině 300 Kč a více.

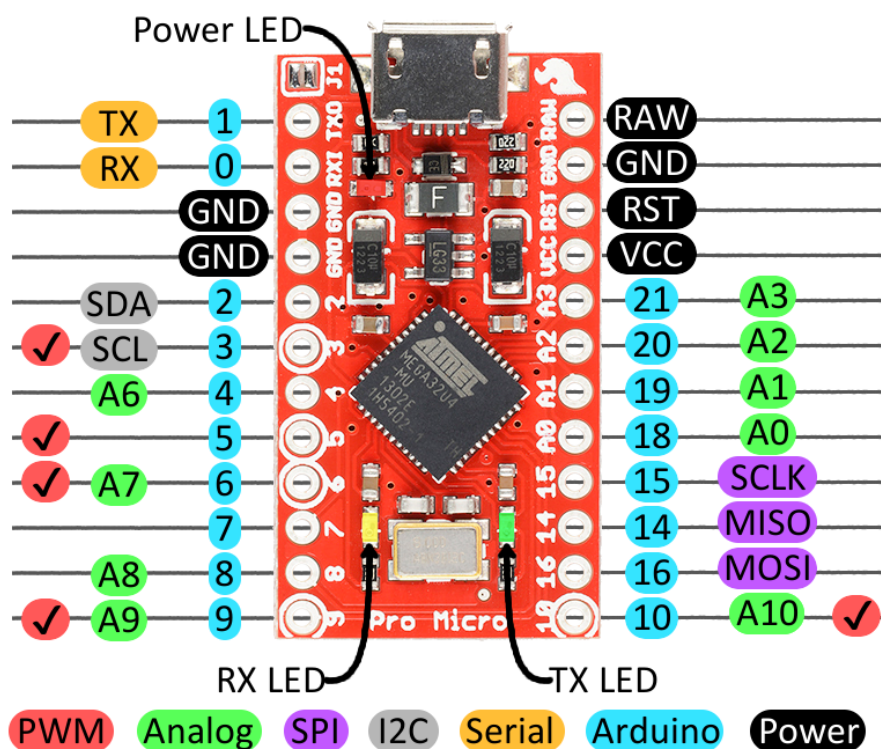


Obrázek 40: SSR relé v zapojení s triakem, pro spínání indukční zátěže [17]

6 Návrh mikropočítačového řídicího modulu

Po vyhodnocení metod snímání proudu, v kapitole 4, jsem se rozhodl realizovat finální zapojení s optočleny BPC-817 a 6N137. První optočlen je výhodný zejména z hlediska nízké ceny a jednoduchého zapojení, v případě druhého optočlenu je výhodou snadno zpracovatelný digitální výstup, který snižuje riziko nepřesného vyhodnocení signálu. Výsledný návrh počítá s využitím obou metod spínání, uvedených v kapitole 5, respektive každá z metod je vhodná pro jiný případ užití, proto jsem se rozhodl otestovat obě dvě.

Jako mikropočítač pro vyhodnocování dat jsem si zvolil mikropočítač Atmel ATmega32U4, konkrétně se jedná o klon Arduina Micro od společnosti SparkFun Electronics nazvaný ProMicro. Mezi jeho největší přednosti patří nízká cena, počítač se dá pořídit zhruba od 100 Kč, a malé rozměry, jen 18 x 33 mm. Počítač disponuje 8-bitovým 16 MHz procesorem, 2 sériovými linkami, 12 digitálními I/O, a 4 I/O s 10-bitovým A/D převodníkem. Mikropočítač vyhodnocuje snímané analogové hodnoty, jako poměr referenčního napětí, kterým je v tomto případě napájecí napětí 5 V. Analogová hodnota je reprezentována číslem integer v rozsahu od 0 do 1023, nejnižší rozlišitelná hodnota je tedy: $5\text{ V} \div 1023 = 4,88\text{ mV}$.

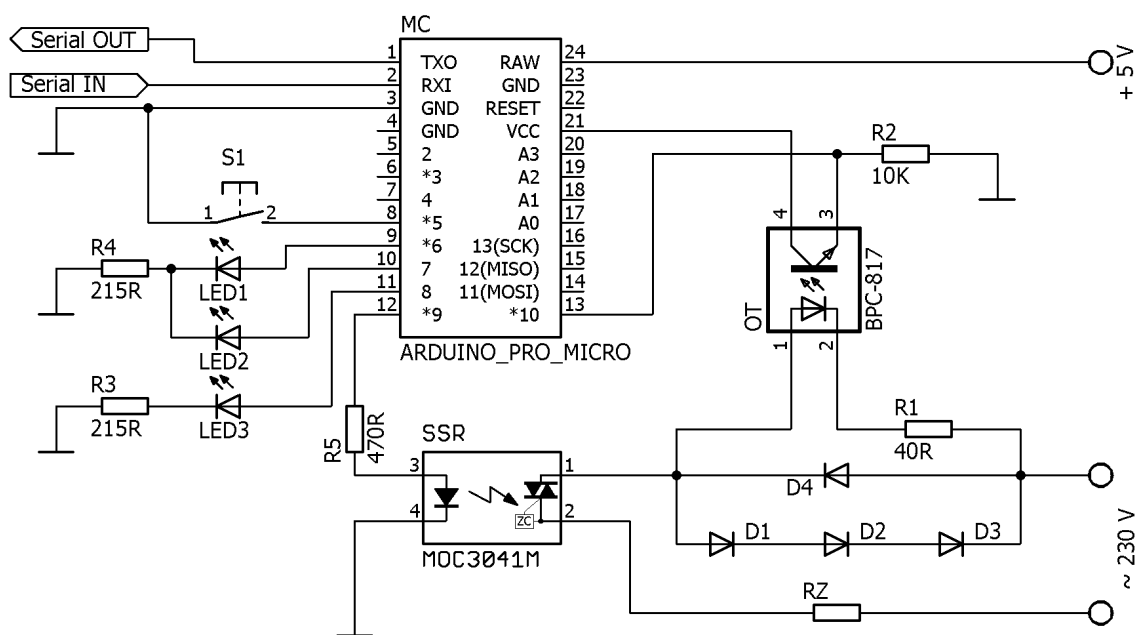


6.1 Zapojení s optočlenem BPC-817 a SSR relé

Základními prvky tohoto návrhu finálního modulu jsou optočlen BPC-817 a SSR relé MOC3041. Modul je dále vybaven několika indikačními prvky a spínačem, který umožňuje manuální ovládání SSR relé. Pro účely testování a řízení modulu slouží sériová linka, mikropočítač skrze ní nepřetržitě odesílá naměřená data, mikropočítač zároveň naslouchá na příkazy k sepnutí a rozepnutí obvodu. V testované konfiguraci byl modul připojen přes RS-232 převodník přímo k počítači, nicméně v praxi by mohl být modul připojen například k Ethernetovému modulu, nebo WiFi modulu ESP8266, což by umožnilo vzdálené řízení modulu.

Modul byl vybaven třemi indikačními LED diodami. Diody D1 a D2 slouží jako indikace protékajícího proudu, D1 indikuje nízký stav protékajícího proudu a D2 naopak vysokou hladinu proudu. Dioda D3 slouží pro indikaci sepnutí SSR relé.

Celý měřicí a řídicí okruh je napájen stejnosměrným napětím 5 V, které je přivedeno na vstup RAW. Ke vstupu RAW je připojen integrovaný stabilizátor napětí, který je akceptuje napětí až 12 V. Stabilizované napětí 5 V je dále distribuováno, skrze výstup VCC, do měřicího optočlenu.



Obrázek 42: Zapojení mikropočítačového modulu s optočlenem BPC-817 a SSR relé

6.1.1 Použité součástky

Pros spínání obvodu bylo zvoleno SSR relé MOC3041M, jedná se o nízko výkonové triakové relé s maximálním výstupním proudem 1 A, pro síťové napětí, s obvodem pro spínání v nule. Izolační pevnost tohoto prvku je 6 kV. Toto relé je určeno primárně pro spínání střídavých proudů,

při použití stejnosměrného proudu není možné zajistit korektní rozepnutí relé, bez přídavných obvodů.

Důležitým parametrem při konstrukci modulu byla výsledná cena, ta se odvíjí převážně od použitého mikropočítače a spínacího SSR relé. Modul realizovaný z komponent v tabulce 6 lze sestavit za přibližně 180 Kč.

Parametry měřícího optočlenu BPC-817 jsou detailněji rozebrány v kapitole 4.2.

R1	předřadný rezistor diody optočlenu		40 Ω
R2	rezistor pro měření úbytku napětí		10 k Ω
R3–R4	předřadný rezistor svítivé diody		215 Ω
R5	předřadný rezistor spínacího obvodu SSR relé		470 Ω
RZ	spotřebič		
D1–D4	usměrňovací dioda BY550-1000	5 A	
S1	mikrospínač		
MC	mikropočítač	Arduino ProMicro	
OT	optočlen s optotranzistorem na výstupu	BPC-817	
SSR	SSR relé	MOC3041M	$I_{MAX} = 1\text{ A}$

Tabulka 6: Seznam použitých součástek a přístrojů v zapojení s optočlenem 6N137

6.1.2 Zpracování a vyhodnocení dat

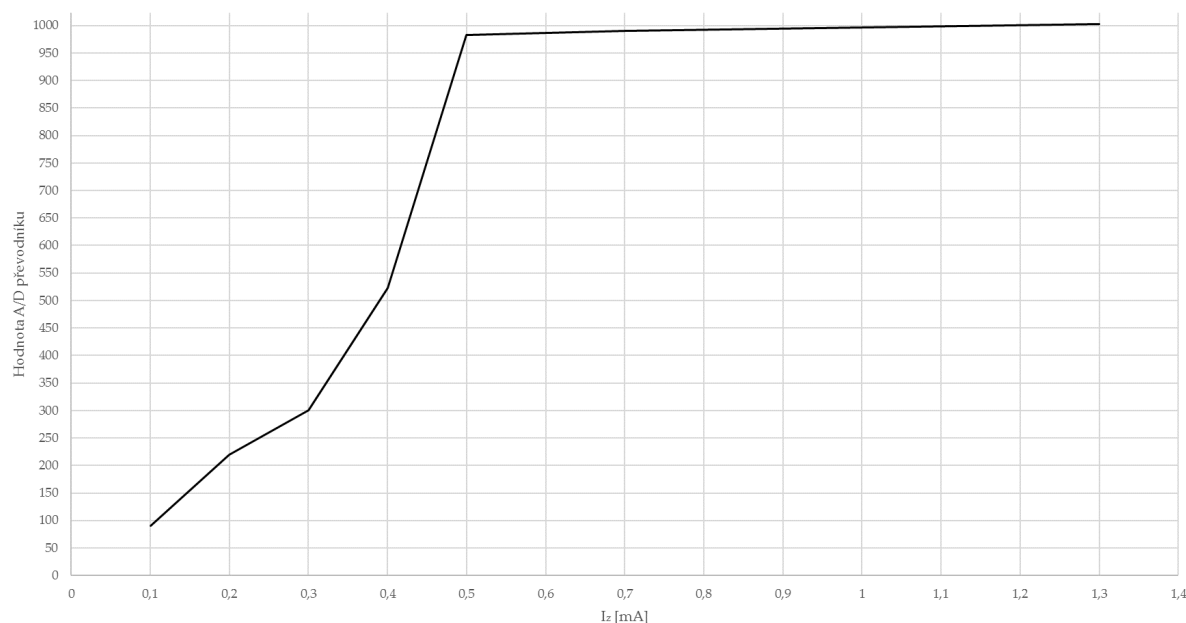
Jako programovací jazyk byl, vzhledem k použité platformě, použit jazyk C/C++ s rozšiřující knihovnou Wiring, která je standardní součástí vývojového prostředí Arduino IDE. Zdrojové kódy řídicího softwaru jsou k dispozici v příloze B.

Výstupní signál z měřícího optočlenu má, při optimálních podmínkách, obdélníkový charakter, jak můžeme vidět na obrázcích 10 a 24. Frekvence signálu je 50 Hz, stejně jako napětí v silovém okruhu. Při vyhodnocení signálu, je důležitá především amplituda tohoto signálu, jelikož reprezentuje proudové maximum silového obvodu. Mikropočítač provádí vzorkování signálu každou milisekundu, tedy s frekvencí 1000 Hz ⁴, v každém intervalu 100 vzorků je nalezena nejvyšší hodnota signálu, která je následně označena jako amplituda. Mikropočítač je tedy schopen určit amplitudu signálu v periodě 100 ms, což zároveň určuje jeho reakční dobu na změnu velikosti proudu silovým obvodem.

A/D převodník mikropočítače reprezentuje vstupní signál jako číselnou hodnotu v rozmezí od 0 do 1023, kde jeden dílek odpovídá napětí 4,88 mV. Převodník zaznamenává nízkou hod-

⁴Doba provádění jednotlivých instrukcí nebyla brána v potaz.

notu napětí, odpovídající hodnotě 10–20 (přibližně 50–100 mV), i ve chvíli kdy je silový obvod rozpojen, tuto hodnotu je tedy nutné brát, jako limitní pro rozlišení užitečného a parazitního signálu. Na obrázku 43 vidíme, že při proudu 0,1 mA se výstupní signál pohybuje na úrovni, kdy jej nelze bezpečně odlišit od parazitního signálu. Jako rozlišovací hranici mezi stavem, kdy obvodem protéká proud a kdy ne jsem zvolil hodnotu 255. Nejnižší snímatelná hladina proudu silovým obvodem je tedy přibližně 0,3 mA.



Obrázek 43: Závislost výstupní hodnoty A/D převodníku na proudu do zátěže I_Z , pro zapojení s optočlenem BPC-817

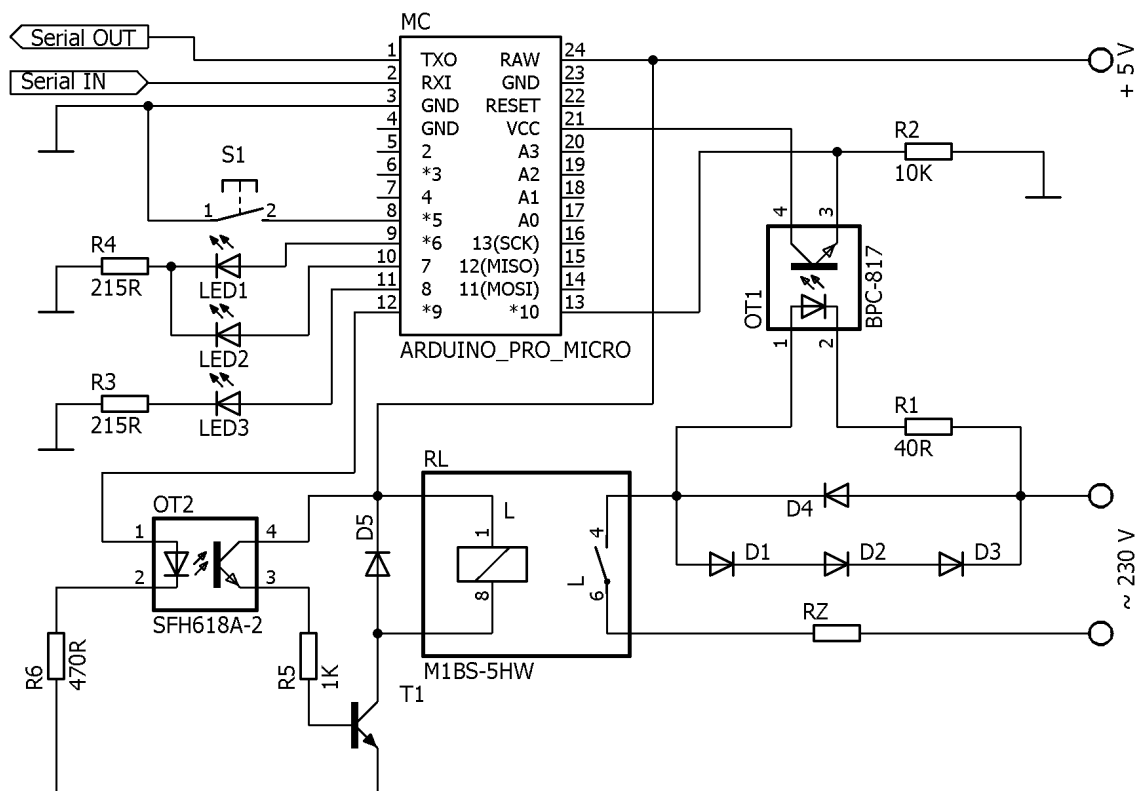
Pro indikaci stavu, kdy silovým obvodem neprotéká téměř žádný proud slouží dioda LED1. Po překročení hodnoty 255 se rozsvítí dioda LED2, jakožto indikace stavu, kdy obvodem protéká proud.

Stav tlačítka S1 je kontrolován každou 1 ms, pakliže je tlačítko vyhodnoceno, jako stisknuté dojde ke 100 ms prodlevě, aby se odstínil možný záchvěv tlačítka. Zároveň je, každých 100 ms, načítán stavu sériové linky a kontroluje se, zda nebyl přijat požadavek na sepnutí obvodu. Sepnutí obvodu je signalizováno svítivou diodou LED3.

6.2 Zapojení s optočlenem BPC-817 a mechanickým relé

Rozdíl oproti předchozímu zapojení je v tomto případě pouze v použitém spínacím prvku, SSR relé je zde nahrazeno mechanickým relé. Spínací cívku relé není možné připojit přímo na výstup mikropočítače, jednotlivé výstupy mikropočítače dokáží poskytnout proud maximálně 40 mA, cívka v sepnutém stavu vyžaduje až 110 mA. Dalším problémem je možnost poškození vstupu

Vzhledem k velikosti proudového odběru cívky, kolem 100 mA, je nutné zajisti, aby byl napájecí zdroj řídicího okruhu dostatečně stabilní, v opačném případě by docházelo k poklesu napětí a tím pádem i ke zkreslení měření.



6.2.1 Použité součástky

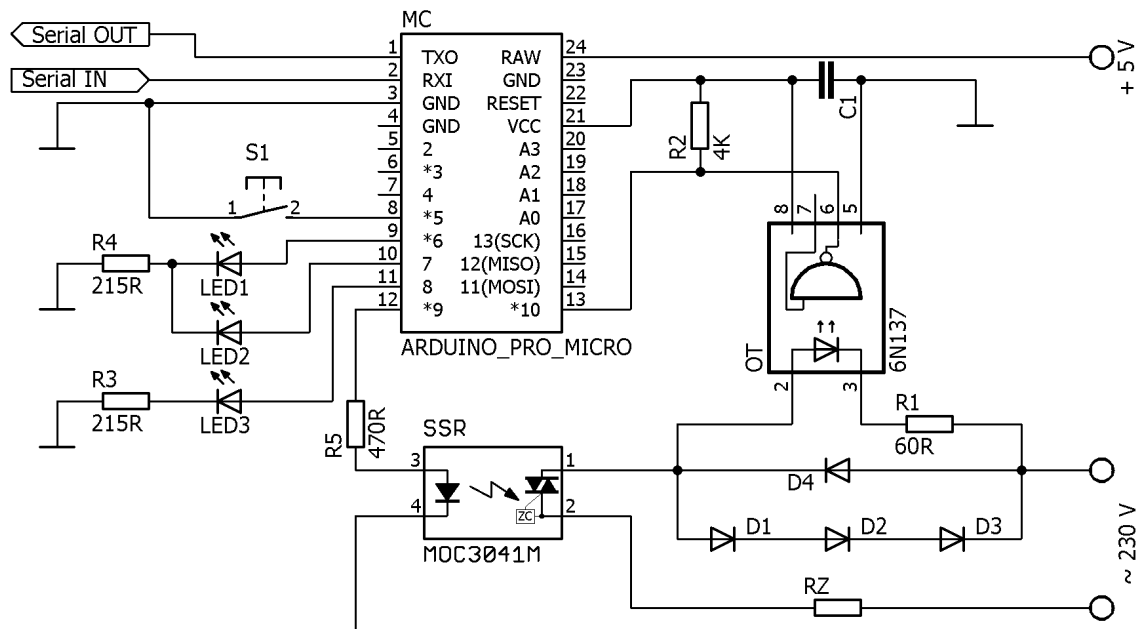
57

R1	předřadný rezistor diody optočlenu		40 Ω
R2	rezistor pro měření úbytku napětí		10 k Ω
R3–R4	předřadný rezistor svítivé diody		215 Ω
R5	předřadný rezistor tranzistoru		1 k Ω
R6	předřadný rezistor diody optočlenu		470 Ω
RZ	spotřebič		
D1–D4	usměrňovací dioda BY550-1000	5 A	
D5	ochranná dioda	1N007	1 A
T1	NPN tranzistor	BC337-25	
S1	mikrospínač		
MC	mikropočítač	Arduino ProMicro	
OT1–OT2	optočlen s optotranzistorem na výstupu	BPC-817	
RL	mechanické relé	M1BS-5HW	$I_{MAX} = 1 \text{ A}$

Tabulka 7: Seznam použitých součástek a přístrojů v zapojení s optočlenem 6N137

6.3 Zapojení s optočlenem 6N137

V tomto návrhu jsem použil měřicí optočlen 6N137. Optočlen má logický TTL výstup, lze jej tedy možné použít i u počítačů bez integrovaného A/D převodníku. Nevýhodou je nižší citlivost na protékající proud, oproti optočlenu BPC-817.



Obrázek 45: Zapojení mikropočítačového modulu s optočlenem 6N137 a SSR relé

6.3.1 Použité součástky

Specifikace SSR relé MOC3041 je popsána v kapitole 6.1.1, nebo literatuře [16]. Měření optočlenu 6N137 je k dispozici v kapitole 4.4.

R1	předřadný rezistor diody optočlenu		60 Ω
R2	pull-up rezistor optočlenu		4 k Ω
R3–R4	předřadný rezistor svítivé diody		215 Ω
R5	předřadný rezistor spínacího obvodu SSR relé		470 Ω
RZ	spotřebič		
D1–D4	usměrňovací dioda BY550-1000	5 A	
S1	mikrospínač		
MC	mikropočítač	Arduino ProMicro	
OT	optočlen s hradlem na výstupu	6N137	
SSR	SSR relé	MOC3041M	$I_{MAX} = 1\text{ A}$

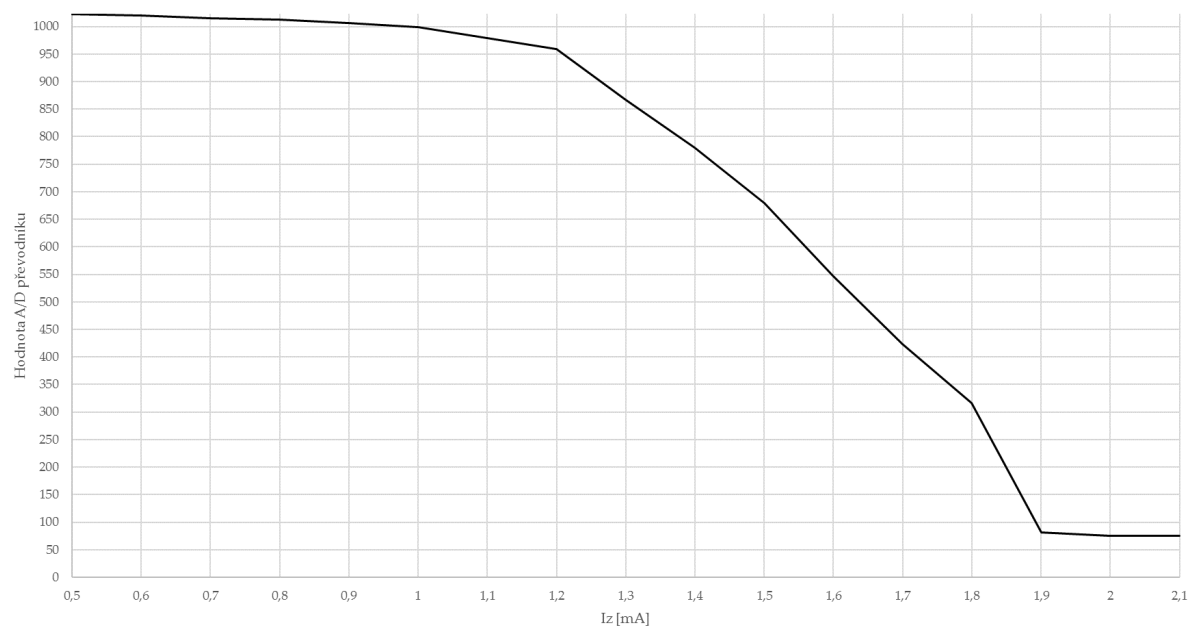
Tabulka 8: Seznam použitých součástek a přístrojů v zapojení s optočlenem 6N137

6.3.2 Zpracování a vyhodnocení dat

Optočlen 6N137 funguje jako hradlo NAND. Pokud vstupní diodou protéká proud je na výstupu úroveň L. Program pro řízení modulu tedy musel být mírně upraven. Metoda vzorkování dat a spínání obvodu zůstali oproti zapojení s optočlenem BPC-817 nezměněny.

Na obrázku 46 je vidět, že optočlen se začíná překlápět při proudu 1 mA. Po překlopení se výstup A/D převodníku ustálí na hodnotě 50–100. Já jsem jako hranici pro vyhodnocení aktivního stavu zvolil hodnotu 800, která odpovídá proudu 1,3 mA. Pokud bychom pro vyhodnocování chtěli použít digitální vstup, je potřeba počítat s o něco vyšší hodnotou. K ustálení optočlenu v úrovni L dochází až při hladině proudu 1,9 mA.

Okomentované zdrojové kódy řídicího softwaru jsou k dispozici v příloze B.



Obrázek 46: Závislost výstupní hodnoty A/D převodníku na proudu do zátěže I_Z , pro zapojení s optočlenem 6N137

7 Závěr

Při výběru metod měření jsem se zaměřil pouze na cenově dostupné metody, které umožňují galvanické oddělení silového a mikropočítačového obvodu. Tuto podmínku splňují metody založené na snímání proudu optočlenem a zapojení s měřícím transformátorem proudu. Metoda měření optočlenem je založena na paralelním zapojení optočlenu a usměrňovacích diod. Při nízké hladině proudu protéká všechna proud diodou optočlenu. Po překročení určité hranice dojde k otevření optočlenu a detekci signálu mikropočítačem. S narůstajícím proudem se otevírají usměrňovací diody a proud optočlenem se již nezvyšuje. Tato metoda vykazuje vynikající citlivost na nízkou hladinu proudu, nicméně se ukázala jako nevhodná při určování skutečné velikosti proudu. Testována byla rovněž metoda detekce proudu měřícím transformátorem. Citlivost tohoto řešení byla řádově horší, oproti metodě s optočleny. Měřící rozsah testovaného transformátoru začínal na hodnotě 40 mA. Na výstupu se ve větší míře projevoval také šum. Výhodou měřících transformátorů je možnost lineární detekce narůstajícího proudu, až do hodnot v řádu desítek ampér. V navrženém modulu jsem se měřicí část rozhodl realizovat pomocí optočlenů BPC-817 a 6N137. Rozhodující pro mě byla příznivá cena a vysoká citlivost. Měřící transformátor jsem do návrhu nezahrnul, z důvodu komplikované detekce nízkých proudů.

Pro spínání silového obvodu jsem zvolil SSR relé. Tyto obvody jsou náhradou za klasická mechanická relé a stykače. Neobsahují mechanické kontakty, mají tedy větší životnost a spínací rychlost. Konstrukce SSR relé je podobná optočlenům, vstup a výstup jsou galvanicky odděleny, ale výstupním prvkem je optotriak. Cenově dostupná SSR relé jsou konstruována jen pro spínání nízkých proudů, maximálně v jednotkách ampér. Proudové spínače jsou tedy často realizovány jako SSR relé v kombinaci s výkonovým triakem, kterým je možné spínat proudy v řádu desítek až stovek ampér.

Pro vyhodnocování a řízení jsem si zvolil mikropočítač ATmega32U4, protože disponuje 4 vstupy s 10-bitovým A/D převodníkem. Díky tomu je možné vyhodnocovat signál z měřícího optočlenu s přesností až 4,88 mV (při použití referenčního napětí 5 V). V realizaci s optočlenem BPC-817 je mikropočítač schopen vyhodnotit protékající proud od 0,3 mA. Stav proudu v obvodu je uživateli signalizován pomocí LED diod a naměřená data jsou odesílána pomocí sériové linky. Modul může přes sériovou linku rovněž přijímat příkazy k sepnutí či rozepnutí obvodu. Uživatel tedy nemusí mít přímý přístup k modulu, ovládání a dohled může být realizován vzdáleně.

Cílem této práce bylo navrhnout spínací modul schopný poskytnout uživateli zpětnou vazbu o průtoku i nízkých proudů. Návrh s měřícím optočlenem a spínáním pomocí SSR relé tyto parametry splňuje. Modul dodržel rovněž podmínku galvanického oddělení řídicího a silového obvodu.

Literatura

- [1] KOVAL, Ludvík a kol.. *Elektrická měření*. [online]. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-TUO, 2012 [cit. 2016-04-11]. ISBN xxxx.
- [2] VACULÍK, Vlastimil. *Snímače proudu*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce PATOČKA, Miroslav.
- [3] Honeywell International Inc.. *Snímače elektrického proudu s Hallovoú sondou*. honeywell.sk. [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: www.honeywell.sk/?com=documents&id=91
- [4] ŠTUKA, Čestmír. *Hallův jev* [obrázek]. WikiSkripta. [online]. 14.4.2016 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/images/7/70/Hall%C5%AFv_jev_b.jpg
- [5] *Description of Galvanic Isolation*. Schneider Electric USA Website. [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.schneider-electric.us/en/faqs/FA157465/>
- [6] *Elektrotechnická měření*. 1. vyd. Editor Libor KUBICA. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-022-9.
- [7] VRÁNA, Václav. *Transformátory*. [online]. Ostrava: VŠB-TUO, 2005 [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/BC_FBI/Prednasky/Trafa_bc.pdf
- [8] BRANDŠTETTER, Pavel, Tomáš PAVELEK, Václav SLÁDEČEK a Petr ŠIMONÍK. *Elektronika: prvky elektronických obvodů*. [online]. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-TUO, 2007 [cit. 2016-04-11]. ISBN 978-80-248-1481-0.
- [9] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické obvody a elektronika*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 142 s. ISBN 80-01-02466-0.
- [10] KESL, Jan. *Elektronika III*. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-075-X.
- [11] Diotec Semiconductor. *BY 550-50 – BY 550-1000*. GM electronic. [online]. 14.4.2016 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/221/029/by550-1000-datasheet-1.pdf>
- [12] *Current measurement applications handbook* [online]. Zetex semiconductors. 2008. [vid 23.9.2015]. Dostupné z: http://www.diodes.com/_files/products_appnote_pdfs/zetex/an39.pdf
- [13] BRIGHT LED ELECTRONICS CORP.. *BPC-817*. GM electronic. [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/img/cache/doc/523/249/bpc-817c-datasheet-1.pdf>

- [14] Agilent Technologies. *High CMR, High Speed TTL Compatible Optocouplers*. GM electronic. [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/523/009/6n137-datasheet-1.pdf>
- [15] LITE-ON Technology Corporation. *ltv814-datasheet*. GM electronic. [online]. 14.4.2016 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/523/244/ltv814-datasheet-1.pdf>
- [16] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. *6-Pin DIP Zero-Cross Optoisolators Triac Driver Output (250/400 Volt Peak)*. GM electronic. [online]. 14.4.2016 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/523/095/moc3041-datasheet-2.pdf>
- [17] MOTOROLA. *6-Pin DIP Random-Phase Optoisolators Triac Driver Output*. GM electronic. [online]. 24.4.2016 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/523/145/moc3011-datasheet-1.pdf>
- [18] TALEMA. *AX Series – 50/60Hz Current Transformers*. TME CZECH REPUBLIC S.R.O.. [online]. 14.4.2016 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/c3170f0698d1c76ef4fd84b4eab3d598/AX%20Series.pdf>
- [19] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Solid state relé*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-081-4.
- [20] *Pro Micro & Fio V3 Hookup Guide*. SparkFun Electronics. [online]. 14.4.2016 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/12640>
- [21] HOSPODKA, Jiří. *Darlingtonovo zapojení*. ČVUT – Fakulta elektrotechnická. [online]. 20.4.2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://hippo.feld.cvut.cz/vyuka/elo/cv4/darlington.pdf>
- [22] *Výkonové spínací prvky*. VŠB-TUO FEI. [online]. 25.4.2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat430/data/vsp/vsp-predn.pdf>

A Tabulky naměřených hodnot

I_Z [mA]	U_{OUT} [V]	U_D [V]	I_Z [mA]	U_{OUT} [V]	U_D [V]	I_Z [mA]	U_{OUT} [V]	U_D [V]
110	2,47	2,4	109	2,47	2,2	110	2,47	2,2
56,5	2,47	2,3	57	2,46	2,08	57	2,46	2,08
38,1	2,47	2,2	36,1	2,46	2	36,8	2,46	2,05
28,6	2,47	2,15	29	2,46	1,95	26,3	2,46	1,99
23,1	2,46	2,12	23,3	2,46	1,88	23,4	2,46	1,96
19,3	2,46	2,05	19,6	2,46	1,84	19,5	2,46	1,94
14,9	2,46	2	15,2	2,46	1,8	15,1	2,46	1,92
11,2	2,46	1,95	12,5	2,46	1,76	12,4	2,46	1,88
10,3	2,46	1,92	10,5	2,46	1,76	10,5	2,45	1,82
8,9	2,46	1,84	9,1	2,45	1,76	9,1	2,45	1,8
7,9	2,45	1,8	8	2,45	1,74	8	2,45	1,76
6,9	2,45	1,8	7	2,45	1,68	7	2,45	1,72
6	2,45	1,72	6	2,45	1,64	5,8	2,45	1,7
5	2,45	1,68	5	2,44	1,56	4,8	2,44	1,6
4	2,44	1,6	4,5	2,44	1,52	4	2,44	1,52
3,5	2,44	1,48	4,1	2,44	1,48	3,5	2,43	1,47
3	2,43	1,4	3,7	2,44	1,44	2,8	2,43	1,4
2,5	2,42	1,36	3	2,43	1,42	2,5	2,42	1,3
2	2,41	1,28	2,6	2,43	1,38	2	2,41	1,2
1,5	2,39	1,2	2	2,41	1,36	1,5	2,4	1,13
1	2,35	1,08	1,5	2,38	1,28	0,9	2,34	1,08
0,8	2,34	1,04	1	2,34	1,2	0,6	2,21	1,02
0,6	2,26	1	0,6	2,28	1,15	0,4	2,04	1
0,4	2,03	0,96	0,5	2,14	1,08	0,341	1,57	0,98
0,356	1,73	0,93	0,4	1,73	1,04	0,301	1,21	0,96
0,3	1,42	0,92	0,351	1,62	1	0,277	1,03	0,94
0,291	1,17	0,91	0,301	1,14	1	0,257	0,88	0,92
0,254	0,88	0,88	0,254	0,82	0,98	0,228	0,67	0,92
0,201	0,52	0,84	0,205	0,51	0,91	0,202	0,51	0,9
0,15	0,26	0,8	0,145	0,23	0,88	0,174	0,36	0,86
0,125	0,17	0,8	0,125	0,15	0,84	0,152	0,26	0,83
0,102	0,1	0,8	0,1	0,09	0,8	0,125	0,16	0,8
0,077	0,05	0,76	0,076	0,04	0,7	0,1	0,09	0,72
0,051	0,02	0,76	0,059	0,02	0,6	0,076	0,04	0,68
0,026	0,02	0,76	0,026	0,02	0,2	0,04	0,02	0,6
0	0,02	0	0	0,02	0	0	0,02	0

(a) Měření s diodou 1N007 (1A)

(b) Měření s diodou RGP30M (3A)

(c) Měření s diodou BY550-1000 (5A)

Tabulka 9: Závislost výstupního signálu optočlenu U_{OUT} a úbytku napětí na diodách U_D na proudu do zátěže I_Z , pro optočlen BPC-817

I_Z [mA]	U_{OUT} [V]	U_D [V]	I_Z [mA]	U_{OUT} [V]	U_D [V]	I_Z [mA]	U_{OUT} [V]	U_D [V]
211,6	2,28	2,2	211,4	2,3	2,2	210	2,33	2,2
72,7	2,27	2,05	72,7	2,29	2	72,5	2,32	2,04
31,3	2,25	1,92	28,4	2,28	1,9	28,3	2,31	1,92
24,2	2,24	1,88	16,8	2,26	1,8	13,3	2,28	1,8
6	2,1	1,65	13,2	2,25	1,75	5	2,2	1,6
5	2,06	1,58	6	2,17	1,68	4	2,15	1,55
4	1,98	1,51	4	2,07	1,58	3,5	2,12	1,5
3,5	1,91	1,5	3,4	2	1,52	2,9	2,05	1,48
3,2	1,85	1,49	3	1,94	1,48	2,5	1,98	1,43
2,6	1,52	1,46	2,5	1,73	1,44	2	1,76	1,4
2,4	1,15	1,44	2,3	1,66	1,42	1,8	1,6	1,4
2,3	1,05	1,42	2,2	1,6	1,4	1,6	1,18	1,4
2,2	0,81	1,42	2,1	1,47	1,38	1,5	0,9	1,4
2,1	0,72	1,4	2	1,15	1,37	1,4	0,52	1,4
2	0,52	1,4	1,9	0,81	1,35	1,3	0,4	1,39
1,9	0,39	1,4	1,8	0,66	1,34	1,2	0,28	1,37
1,8	0,31	1,4	1,7	0,54	1,34	1,1	0,14	1,35
1,7	0,22	1,4	1,6	0,34	1,33	1	0,09	1,32
1,6	0,13	1,4	1,5	0,21	1,33	0,9	0,07	1,32
1,5	0,11	1,4	1,3	0,12	1,32	0,8	0,06	1,3
1,4	0,09	1,39	1,2	0,07	1,3	0,7	0,02	1,27
1,3	0,06	1,38	1,1	0,05	1,28	0,6	0,02	1,25
1,2	0,05	1,36	1	0,04	1,26	0,5	0,02	1,23
1,1	0,03	1,34	0,9	0,02	1,23	0,4	0,02	1,2
1	0,02	1,32	0,8	0,02	1,23	0,3	0,02	1,2
0,9	0,02	1,32	0,7	0,02	1,23	0,2	0,02	1,2
0,8	0,02	1,32	0,6	0,02	1,23	0,1	0,02	1,2
0,7	0,02	1,32	0,5	0,02	1,23	0	0,02	0
0,6	0,02	1,32	0,4	0,02	1,23			
0,5	0,02	1,32	0,3	0,02	1,23			
0,1	0,02	1,32	0,2	0,02	1,23			
0	0,02	0	0	0,02	0			

(a) Měření s rezistorem $R_2 = 470 \Omega$ (b) Měření s rezistorem $R_2 = 1000 \Omega$ (c) Měření s rezistorem $R_2 = 4000 \Omega$

Tabulka 10: Závislost výstupního signálu optočlenu U_{OUT} a úbytku napětí na diodách U_D na proudu do zátěže I_Z , pro optočlen 6N137

B Zdrojové kódy

B.1 Řízení mikropočítače v zapojení s optočlenem BPC-817

```
/* pin assignment */
const int voltageAnalogPin = A10; // optocoupler signal input
const int relayControlled = 8; // relay status indication
const int lowCurrentLed = 6; // low current indication
const int highCurrentLed = 7; // high current indication
const int controlButton = 5; // manual relay control
const int relaySwitch = 9; // switching relay

int inputVoltageValue = 0; // output value of A/D converter
bool relayStatus = true; // default relay status
int localVoltageMax = 0; // signal amplitude in measurement period
const int currentLimit = 255; // current level edge

void setup() {
    Serial.begin(9600); // setting the serial line on speed 9600 Bd
    pinMode(relayControlled, OUTPUT);
    pinMode(lowCurrentLed, OUTPUT);
    pinMode(highCurrentLed, OUTPUT);
    pinMode(controlButton, INPUT_PULLUP);
    pinMode(relaySwitch, OUTPUT);
}

void loop() {
    for (int i = 0; i < 100; i++) { // measuring period 100 ms
        inputVoltageValue = analogRead(voltageAnalogPin); // read value from A/D
            converter
        if (inputVoltageValue > localVoltageMax) { // find local signal amplitude
            localVoltageMax = inputVoltageValue;
        }
        if (digitalRead(controlButton) == LOW) { // control of button status
            delay(40);
            if (digitalRead(controlButton) == LOW) { // button debounce
                SwitchRelay();
            }
        }
        delay(60);
    }
}
```

```

    }
    delay(1);
}
String serialCmd = "";
if (Serial.available()) { // read commands from the serial line
    serialCmd = (char)Serial.read();
}
if (serialCmd != "") {
    SwitchRelay();
}
// send sensor data to the serial line
Serial.print("sensor = ");
Serial.print(localVoltageMax);
Serial.print(" relay = ");
Serial.println(relayStatus);
// testing current level
if (localVoltageMax <= currentLimit) { // low current level
    digitalWrite(lowCurrentLed, HIGH);
    digitalWrite(highCurrentLed, LOW);
} else { // high current level
    digitalWrite(lowCurrentLed, LOW);
    digitalWrite(highCurrentLed, HIGH);
}
localVoltageMax = 0;
}
// switching relay
void SwitchRelay() {
    if (relayStatus) { // deactivate relay
        digitalWrite(relaySwitch, LOW);
        digitalWrite(relayControlled, LOW);
        relayStatus = false;
    } else { // activate relay
        digitalWrite(relaySwitch, HIGH);
        digitalWrite(relayControlled, HIGH);
        relayStatus = true;
    }
}
}

```

Výpis 1: Program pro řízení mikropočítače v zapojení s optočlenem BPC-817

B.2 Řízení mikropočítače v zapojení s optočlenem 6N137

```
/* pin assignment */
const int voltageAnalogPin = A10; // optocoupler signal input
const int relayControlled = 8; // relay status indication
const int lowCurrentLed = 6; // low current indication
const int highCurrentLed = 7; // high current indication
const int controlButton = 5; // manual relay control
const int relaySwitch = 9; // switching relay

int inputVoltageValue = 0; // output value of A/D converter
bool relayStatus = false; // default relay status
int localVoltageMax = 0; // signal amplitude in measurement period
const int currentLimit = 800; // current level edge

void setup() {
    Serial.begin(9600); // setting the serial line on speed 9600 Bd
    pinMode(relayControlled, OUTPUT);
    pinMode(lowCurrentLed, OUTPUT);
    pinMode(highCurrentLed, OUTPUT);
    pinMode(controlButton, INPUT_PULLUP);
    pinMode(relaySwitch, OUTPUT);
}

void loop() {
    for (int i = 0; i < 100; i++) { // measuring period 100 ms
        inputVoltageValue = analogRead(voltageAnalogPin); // read value from A/D
            converter
        if (inputVoltageValue > localVoltageMax) { // find local signal amplitude
            localVoltageMax = inputVoltageValue;
        }
        // obsluha tlacitka
        if (digitalRead(controlButton) == LOW) { // control of button status
            delay(40);
            if (digitalRead(controlButton) == LOW) { // button debounce
                SwitchRelay();
            }
            delay(60);
        }
    }
}
```

```

    delay(1);
}
String serialCmd = "";
if (Serial.available()) { // read commands from the serial line
    serialCmd = (char)Serial.read();
}
if (serialCmd != "") {
    SwitchRelay();
}
// send sensor data to the serial line
Serial.print("sensor = ");
Serial.print(localVoltageMax);
Serial.print(" relay = ");
Serial.println(relayStatus);
// testing current level
if (localVoltageMax <= currentLimit) { // low current level
    digitalWrite(lowCurrentLed, HIGH);
    digitalWrite(highCurrentLed, LOW);
} else {
    digitalWrite(lowCurrentLed, LOW);
    digitalWrite(highCurrentLed, HIGH);
}
localVoltageMax = 0;
}
// switching relay
void SwitchRelay() {
    if (relayStatus) {
        digitalWrite(relaySwitch, LOW);
        digitalWrite(relayControlled, LOW);
        relayStatus = false;
    } else {
        digitalWrite(relaySwitch, HIGH);
        digitalWrite(relayControlled, HIGH);
        relayStatus = true;
    }
}
}

```

Výpis 2: Program pro řízení mikropočítače v zapojení s optočlenem 6N137